

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21760286

研究課題名（和文） 電力線を用いた低遅延・高信頼な機械系制御信号ネットワークの研究

研究課題名（英文） Studies on Actuator Control Signal Networks with Power Line for Low Latency and High Reliability

研究代表者

梅原 大祐 (UMEHARA DAISUKE)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：50314258

研究成果の概要（和文）：アクチュエータ制御信号ネットワークの一つである車載ネットワークに対して、低遅延かつ高信頼を実現するための通信方式を提案し、その評価を行い、その有効性を実証した。車載のシングルワイヤ電力線上で生じる信号減衰及びインパルス性雑音を実測ベースで解析し、遅延検波による差動符号化2相PSK（Phase Shift Keying）により、ビット時間のオーダーの遅延で高信頼な低速系車載ネットワークが実現可能であることを明らかにした。さらに、1対ツイストペアケーブルによるネットワークバスにおいて、車載ネットワークの標準規格であるコントローラエリアネットワーク（Control Area Network, CAN）の高速化及び高多重化を実現可能な短パルス伝送路符号を提案した。短パルス伝送路符号を実装した試作機により、提案手法の有効性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have proposed communication systems achieving low latency and high reliability for in-vehicle network which is one of actuator control signal networks. We have evaluated the proposed systems and have shown their effectiveness with simulations and experimental trials. We have analyzed signal attenuation and impulsive noise over in-vehicle single-wire power lines through actual measurements and have shown the feasibility of low-rate in-vehicle networks achieving latency with bit time order and high reliability by differential binary phase shift keying (DBPSK) with differential detection. Furthermore, we have proposed short pulse line codes achieving controller area network (CAN), which is an international standard for in-vehicle networks, with high rate and high multiplexing for one pair of twisted pair cables. We have shown the effectiveness of short-pulse line codes with prototypes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：通信工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：(1) 電力線通信 (2) 制御信号 (3) 低遅延 (4) 高信頼 (5) 省線化 (6) イーサネット (7) ネットワークバス

1. 研究開始当初の背景

自動車内に搭載されるアクチュエータやセンサーの高機能化に伴い、車載ネットワークシステムは複雑化の一途を辿っている。自動車内では、多数のアクチュエータやセンサーがネットワークに接続される。そこで、燃費向上などの目的を達成するために、ネットワークケーブルの省線化や一つのネットワークバス内のアクチュエータ及びセンサーの収容能力の向上が望まれてきた。一方、アクチュエータなどを制御するための車載ネットワークにおける通信規格である LIN (Local Interconnect Network) 及び CAN (Controller Area Network) では、自動車内のセーフティや快適さを維持するために通常の通信ネットワークと比較して低遅延及び高信頼なネットワーク構成が要求される。

2. 研究の目的

本研究課題では、ネットワークケーブルの省線化及びネットワークバスの収容能力の向上を目的として、データリンク層の通信規格である LIN 及び CAN に変更を加えず、シングルワイヤ電力線や 1 対ツイストペアケーブルによる電力と制御信号の統合配送を実現するための低遅延及び高信頼の通信方式について提案する。提案する通信方式の性能を評価するための評価指標を与え、提案方式と従来方式を比較検討し、提案方式の有効性を計算機シミュレーション及び実証実験により明らかにする。

3. 研究の方法

LIN の実現についてはシングルワイヤ電力線、CAN の高速化・高多重化については 1 対ツイストペアケーブルを伝送媒体とした。以下、通信規格と伝送媒体の違いに応じて実施された研究の方法を記述する。

(1) シングルワイヤ電力線による LIN の実現については、主に、2009 年度と 2010 年度にかけて実施した。通信路モデル化を実現するために、住友電気工業株式会社から車載シングルワイヤ電力線におけるアクチュエータ駆動時の雑音の時間領域観測データ及びネットワークアナライザの測定による広帯域の周波数応答データの提供を受けた。これらのデータをもとに、アクチュエータ駆動時のインパルス性雑音の特性及び信号減衰の特性を解析し、計算機上に車載シングルワイヤ電力線による通信路をモデル化した。作成した通信路モデルにより、ビット時間オーダの遅延を実現可能な各種の変調方式の信頼性を評価し、LIN で要求される条件を満足できるかどうかの検証を行った。LIN の要求条件を満足する、コスト効率の高い変調方式を選

定し、実証実験のための試作機を製作した。試作機に基づく実験により、提案方式の実現可能性と実装上の新たな問題点の洗い出しを行った。

(2) 1 対ツイストペアケーブルによる CAN の高速化・高多重化については、主に、2011 年度と 2012 年度に実施した。株式会社オートネットワーク技術研究所とのミーティングにより、車載 CAN に将来的に要求される伝送速度とノード収容能力を洗い出し、車載 CAN の高速化・高多重化の目標値とした。高速化・高多重化の目標値を達成するために問題となる要因の一つとしてリングングによる符号間干渉を検証した。リングングの問題点を解決するために新たな伝送路符号を提案し、電子回路シミュレータを用いて、提案した伝送路符号の有効性を検証した。提案方式の有効性が明らかにされたため、FPGA を用いて提案方式の試作機を製作した。試作機による実証実験の結果から、提案方式の実現可能性及び有効性を明らかにした。

4. 研究成果

本研究課題を、シングルワイヤ電力線による LIN の実現と 1 対ツイストペアケーブルによる CAN の高速化・高多重化に分割して、研究成果を述べる。

(1) 車載シングルワイヤ電力線に関して、住友電気工業と共に、雑音測定を行った。アクチュエータ駆動時に突発的で高い振幅値を有するインパルス性雑音が観測された。図 1 は、特に顕著なインパルス性雑音が観測されたドアロックモータ駆動時の雑音である。

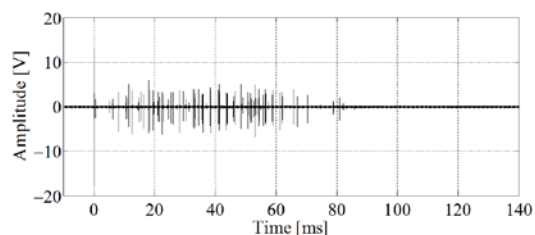


図 1: ドアロック雑音

観測雑音中のインパルス性雑音の特性を評価するために、インパルス性雑音を精度良く推定するための BW-MAP (Baum-Welch Maximum A Posteriori) アルゴリズムを提案した。さらに、その初期値を与えるアルゴリズムとしてモーメント法の利用を提案し、サンプル尖度によりガウス雑音か否かの判定を行った。提案した BW-MAP アルゴリズムにより、主にインパルス性雑音の抽出に用いられていたカイ二乗検定に比べて高い精度

の抽出が実現されることが計算機シミュレーションにより確認された。

図2は、提案したBW-MAPアルゴリズムにより、ドアロック雑音から検出されたインパルス性雑音のうち最長の継続時間を有するものである。図2のインパルス性雑音の継続時間は2.41 μs であり、大部分のインパルス性雑音は1 μs 以下である。周波数スペクトラム解析により、図2のインパルス性雑音は9 MHz 付近にエネルギーが集中していることが判明した。

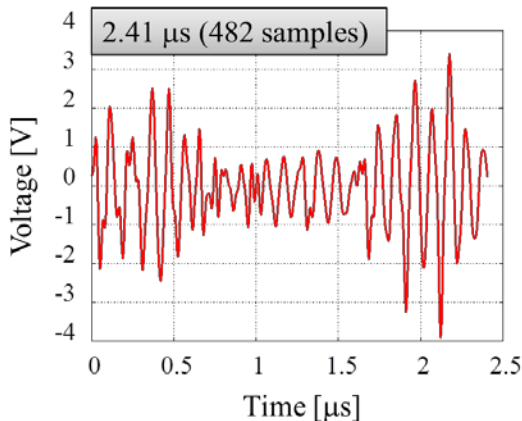


図2. 抽出されたインパルス性雑音

LIN がサポートする最大伝送速度 20 kbps である。LIN のビット時間は最短で 50 μs であり、シングルワイヤ電力線上で生じるインパルス性雑音の継続時間より十分長い。そのため、インパルス性雑音が重畳される信号成分をリミッタで除去しても、ビット区間の大部分は正常な位相情報を与えることが期待できる。そこで、実測したドアロック雑音のデータから、インパルス性雑音の振幅・周波数・位相、及び、背景雑音電力を推定した上で、それらの情報をもとにモデル化したドアロック雑音に対して、ハードリミッタ及び遅延検波を用いた DBPSK 変調のビット誤り率特性を検証した。このとき、再送制御の利用を考慮に入れた回線計算により、信号対雑音電力比 62 dB においてビット誤り率 10^{-4} 以下が満足されれば、十分な信頼性が得られることを導き出した。図3に、インパルス性雑音のエネルギーが集中する周波数を 10 MHz と 30 MHz としたときに、キャリア周波数 10 MHz とした DBPSK 変調のビット誤り率特性を示す。図3の結果から、たとえ信号周波数帯がインパルス性雑音のエネルギーが集中する周波数帯を含む場合においても、ハードリミッタを用いることにより、信号対雑音電力比に十分なマージンを与えることが可能であることが分かる。低伝送速度の LIN の場合、インパルス性雑音のスペクトラム形状によらず、ハードリミッタを採用した

DBPSK 変調により十分な信頼性を与えることを明らかにした。

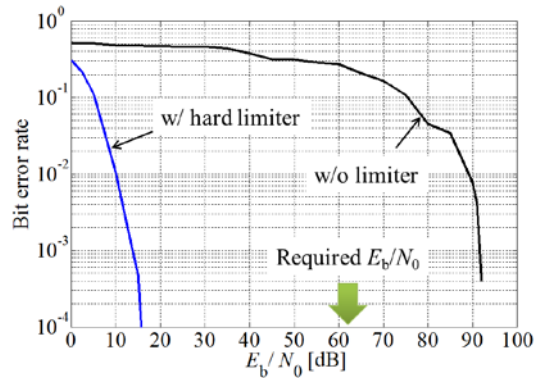


図3. DBPSK 変調のビット誤り率

シングルワイヤ電力線を用いた車載制御ネットワークに関する研究成果は、査読有り国際会議論文 3 件、学会発表 10 件、特許出願 3 件にて発表されている。なお、学会発表 10 件のうち、3 件が招待講演である。また、学会発表にて、電子情報通信学会通信方式研究会の平成 21 年度委員長賞及び平成 22 年度奨励賞を受賞している。

(2) 自動車内のアクチュエータやセンサーの増加に伴い、1 対ツイストペア線を用いたネットワークバス構成の CAN の高速化・高多重化が望まれている。しかし、多数の電子制御ユニット(Electronic Control Unit, ECU)を同一ネットワークバスに接続することにより、分岐が増えることで多数の電気的不整合点が生じる。その結果、多数の反射波が受信ノードで合成されることにより、振幅が大きく継続時間が長いリングングが観測される。さらに、伝送速度の高速化はビット時間の短縮と等価であり、高振幅・長継続時間のリングングの影響が符号間干渉によるビット判定誤りとして現れる。以上のことから、CAN の NRZ (Non Return to Zero) 伝送路符号では、高速化・高多重化は安定して実現できない。多数のノードが接続された高速 CAN では、ある非終端ノードが“01”送信した場合に、そのノードのレセプ送信のビット時間内で高振幅・長継続時間のリングングが観測されることがある。その要因は、レセプ送信時には送信ノード自身が高インピーダンスになり、自身に到達する信号をほぼ全反射することに起因する。この干渉は自己干渉であるため、アービトレーション ID の送信時にも観測される。その結果、自身がレセプ送信しているにもかかわらずバスの電位を 2 V と過検出することで、自身のデータ送信を停止し、通信自体が不能となる。ビット振幅及びビット時間に比較して高振幅・長継続時間のリングングは、アービトレーション

機能を有する CAN プロトコルにとって致命的な問題を引き起こす。

車載 CAN の標準規格 SAE J2284 では、伝送速度 500 kbps 及び接続可能ノード数 24 を規定している。そこで、CAN プロトコルに変更を加えずに、伝送速度 1 Mbps 及び接続ノード数 32 の実現を目標とした。図 4 に高速化・高多重化 CAN の評価用のネットワークバスを示す。図 4 の中央 2 ノードでは、多数の反射波が同相で合成されるため、自己診断ノードで観測されるリングングの振幅は高く、継続時間は長くなる。

図 4. 評価用ネットワークバス

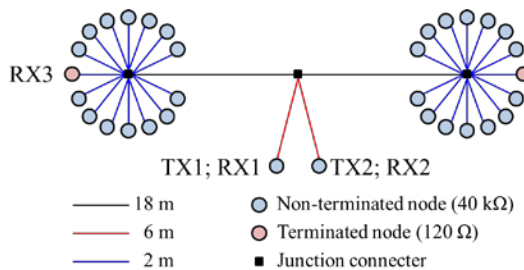


図 4 の送信機 TX1 よりテストビット列“01”を NRZ 伝送路符号で送信する場合、受信機 RX1 では高振幅のリングングによりビット“0”と過検出される可能性が高い。そこで、従来の NRZ 伝送路符号のドミナントパルスのパルス長を短くした短パルス伝送路符号を提案する。ドミナントパルス長を短くすることにより、次のレセプ区間に関するリングングの影響は緩和する。しかし、“0”と過検出される時間区間は存在するため、伝送路符号の判定方式として重み付け多数決判定方式を提案する。重み付け多数決判定方式とは、レセプへの影響が顕著なビット列“01”を送信したときにドミナント区間とレセプ区間の判定区間にそれぞれのドミナントと判定されたサンプルポイント数の中間値を多数決判定のしきい値とする判定方式である。これにより、ドミナント区間に続くレセプ区間に現れるリングングによる過検出誤りを防ぐ。

提案した短パルス伝送路符号を評価するために、評価パラメータとして、検出マージンを定義する。検出マージンとは、ビット列“01”を送信したときのそれぞれのドミナント判定サンプルポイント数の差を判定サンプルポイントの総数で正規化したものである。検出マージンの値域は-1 から+1 であり、0 以下であれば正しく判定可能なしきい値は存在せず、0 を越えれば正しく判定可能なしきい値が存在する。+1 に近づくほど、マージンが高くなり、外乱に対してロバストになる。判定区間は実装時に受信シンボルの最初の部分で判定するため、0.1 μ s から 0.25 μ s とした。

図 5 に、与えられたドミナントパルス長に対して、送信機 TX1 から送信されたビット列“01”に対する受信機 RX1, RX2, RX3 で観測される波形から導き出された検出マージンを示す。この結果から、RX3 のパルス長 0.1 μ s 以外は正しく判定可能なしきい値が存在する。しかし、全てのノードに対して、最大の検出マージンを与える最適なパルス長は存在しない。アービトレーション ID のレセプがドミナントと判定された場合、そのノードからの送信は不能となり、致命的である。そのため、試作機による実証実験では、RX1 において最大の検出マージンを与えるパルス長 0.5 μ s を採用した。FPGA により製作された試作機による実証実験では、図 4 の評価用ネットワークバスに対して、送信機 TX1 から受信機 RX2 への通信が正しく行われることを確認できた。この結果、実機においても短パルス伝送路符号による CAN の高速化・高多重化の実現可能性が示された。

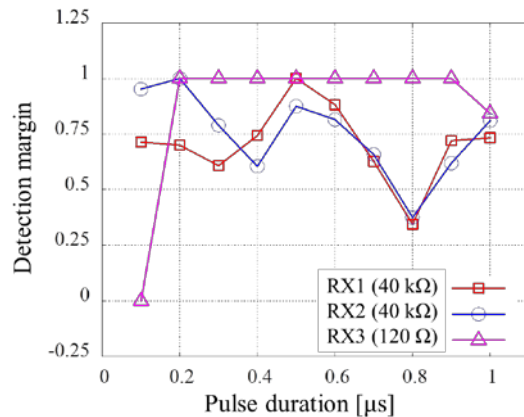


図 5. パルス長に対する検出マージン

ネットワークバス上の CAN の高速化・高多重化に関する研究成果は、査読有り国際会議論文 1 件に採録され 2013 年 6 月に発表予定である。また、既出の学会発表は 6 件、特許出願は 6 件である。今後、学会発表 2 件を予定しており、短パルス伝送路符号による CAN の高速化・高多重化に関する研究テーマは、更なる発展が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① S. Nitta, D. Umehara, K. Wakasugi, S. Ishiko, and T. Tsubouchi, High rate and high multiplexing CAN by short pulse line codes, Proceedings of the 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC Spring 2013), 査読有, 掲載予定, June 2013.

- ② Y. Yabuuchi, D. Umehara, M. Morikura, T. Morita, S. Ishiko, and S. Horihata, Low rate and high reliable modulation schemes for in-vehicle power line communications, Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications (IEEE ISPLC 2011), 査読有, April 2011, pp. 249-254, DOI: 10.1109/ISPLC.2011.5764401.
- ③ Y. Yabuuchi, D. Umehara, M. Morikura, T. Hisada, S. Ishiko, and S. Horihata, Measurement and analysis of impulsive noise on in-vehicle power lines, Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications (IEEE ISPLC 2010), 査読有, March 2010, pp. 325-330, DOI: 10.1109/ISPLC.2010.5479913.
- ④ D. Umehara, M. Morikura, T. Hisada, S. Ishiko, and S. Horihata, Statistical impulse detection of in-vehicle power line noise using hidden Markov model, Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications (IEEE ISPLC 2010), 査読有, March 2010, pp. 341-346, DOI: 10.1109/ISPLC.2010.5479912.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 梅原大祐, 高速・高多重 CAN のための短パルス伝送路符号とその最適化問題, 第 25 回 RAMP シンポジウム, 2013 年 10 月 29 日, 鹿児島大学稲盛会館.
- ② 高橋朋宏, イベント駆動型インピーダンス整合機能を適用した短パルス CAN の検討, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2013 年 7 月 5 日, 与那国町複合型公共施設 (与那国島).
- ③ 高橋朋宏, イベント駆動型インピーダンス整合を用いた短パルス CAN のリンギング抑制方式, 2013 年 電子情報通信学会 総合大会, 2013 年 3 月 19 日, 岐阜大学.
- ④ 新田真吾, T 行列を用いた縦続接続ツイストペアケーブルの解析モデルの検討, 2013 年 電子情報通信学会 総合大会, 2013 年 3 月 19 日, 岐阜大学.
- ⑤ 梅原大祐, [招待講演] 車載通信ネットワークの省線化への取り組み, 電子情報通信学会 ワイドバンドシステム研究会, 2012 年 10 月 26 日, 京都大学.
- ⑥ 新田真吾, 短パルスを用いた CAN の高速・高多重化, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2012 年 7 月 13 日, 知名町公

民館 (沖永良部島).

- ⑦ 新田真吾, 短パルスを用いた CAN の高速・高多重化の一検討, 2012 年 電子情報通信学会 総合大会, 2012 年 3 月 20-23 日, 岡山大学.
- ⑧ 梅原大祐, 短パルス伝送路符号を用いた CAN の高速化, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2011 年 11 月 17 日, 名湯の森ホテルきたふくろう (北海道).
- ⑨ 梅原大祐, [招待講演] 車載狭帯域電力線通信における低コストな変調・検出方式, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2011 年 7 月 7 日, 久米島.
- ⑩ 藪内靖弘, 車載電力線通信に適した変調方式の検討, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2010 年 11 月 11 日, 和倉温泉観光会館 (石川県).
- ⑪ 梅原大祐, 車内電力線によるエネルギーと情報の統合配送, 2010 年 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ大会, 2010 年 9 月 14-17 日, 大阪府立大学.
- ⑫ 梅原大祐, [招待講演] 車載電力線通信におけるインパルス性雑音緩和方式の提案, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2010 年 7 月 8 日, 与論島パークホテル.
- ⑬ 藪内靖弘, 車載 PLC におけるインパルス性雑音の一考察, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2010 年 7 月 9 日, 与論島パークホテル.
- ⑭ 藪内靖弘, 車載電力線上の雑音測定と解析, 2010 年 電子情報通信学会 総合大会, 2010 年 3 月 16-19 日, 東北大学.
- ⑮ 藪内靖弘, 車載電力線上の雑音に対する測定と解析, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2010 年 3 月 1 日, 宮古島 ブリーズベイマリーナ.
- ⑯ 梅原大祐, 車載電源線上の雑音に対するインパルス検出法の改良, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2009 年 12 月 8 日, 名古屋大学.
- ⑰ 梅原大祐, 車載電源線上の雑音に対するインパルス検出の一考察, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2009 年 7 月 2 日, 福江文化会館 (長崎県).

[産業財産権]

○出願状況 (計 9 件)

名称: 通信方法、通信システム及び通信装置
 発明者: 梅原大祐, 石河伸一
 権利者: 京都工芸繊維大学, 住友電気工業株式会社, 住友電装株式会社, 株式会社オートネットワーク技術研究所
 種類: 特許
 番号: 特願 2012-225337
 出願年月日: 24 年 10 月 10 日
 国内外の別: 国内

名称：通信方法、通信システム及び通信装置
発明者：梅原大祐，石河伸一
権利者：京都工芸繊維大学，住友電気工業株式会社，住友電装株式会社，株式会社オートネットワーク技術研究所
種類：特許
番号：特願 2012-225338
出願年月日：24年10月10日
国内外の別：国内

名称：通信システム、通信装置、通信方法及び通信パラメータ決定方法
発明者：梅原大祐，石河伸一，坪内利康
権利者：京都工芸繊維大学，住友電気工業株式会社，住友電装株式会社，株式会社オートネットワーク技術研究所
種類：特許
番号：特願 2012-047060
出願年月日：24年3月2日
国内外の別：国内

名称：通信システム、通信装置及び通信方法
発明者：梅原大祐，石河伸一，坪内利康
権利者：京都工芸繊維大学，住友電気工業株式会社，住友電装株式会社，株式会社オートネットワーク技術研究所
種類：特許
番号：特願 2011-273710
出願年月日：23年12月14日
国内外の別：国内

名称：通信システム、通信装置及び通信方法
発明者：梅原大祐，石河伸一，坪内利康
権利者：京都工芸繊維大学，住友電気工業株式会社，住友電装株式会社，株式会社オートネットワーク技術研究所
種類：特許
番号：特願 2011-241621
出願年月日：23年11月2日
国内外の別：国内

名称：通信システム、通信装置及び通信方法
発明者：梅原大祐，石河伸一，坪内利康
権利者：京都工芸繊維大学，住友電気工業株式会社，住友電装株式会社，株式会社オートネットワーク技術研究所
種類：特許
番号：特願 2011-223260
出願年月日：23年10月7日
国内外の別：国内

名称：電力線通信システム
発明者：梅原大祐，藪内靖弘，守倉正博，久田俊哉，石河伸一，堀端啓史，森田哲郎
権利者：京都大学，住友電気工業株式会社，住友電装株式会社，株式会社オートネットワ

ーク技術研究所
種類：特許
番号：特願 2011-219520
出願年月日：23年10月3日
国内外の別：国内

名称：NOISE DETECTION METHOD, NOISE DETECTION APPARATUS, SIMULATION METHOD, SIMULATION APPARATUS, AND COMMUNICATION SYSTEM
発明者：D. Umehara, M. Morikura, T. Hisada, S. Ishiko, S. Horihata
権利者：AUTONETWORKS TECHNOLOGIES, LTD., SUMITOMO WIRING SYSTEMS, LTD., SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.
種類：特許
番号：US 2010/0329320 A1
出願年月日：22年12月30日
国内外の別：国外

名称：雑音検出方法、雑音検出装置、シミュレーション方法、シミュレーション装置、及び通信システム
発明者：梅原大祐，守倉正博，久田俊哉，石河伸一，堀端 啓史
権利者：京都大学，住友電気工業株式会社，住友電装株式会社，株式会社オートネットワーク技術研究所
種類：特許
番号：特願 2010-131191
出願年月日：22年6月8日
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ice.is.kit.ac.jp/~umehara/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅原 大祐 (UMEHARA DAISUKE)
京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教授
研究者番号：50314258

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：