

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560428

研究課題名(和文)ミリ波帯漏洩波を利用した位置情報検出システムの構築

研究課題名(英文)Construction of position detecting system by using millimeter-wave leaky waves

研究代表者

辻 幹男(Tsuji, Mikio)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：50148376

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では位置情報検知システムの簡易構築を目的に、まず、1次元方向のビーム走査が周波数掃引により容易に行える漏洩波アンテナの高機能化を図った。前方から後方に連続放射が可能なバランス条件を満たす右手/左手系複合線路アンテナについて、平面回路線路ではバランス点の周波数制御が可能な単位セル形状を、また導波管では遮断TEおよびTMモード区間を縦続接続した単位セル形状を開発し、実験的にもそれらの有用性を検証した。さらにスタブ付漏洩導波管アンテナを用いて2元走査のためのアレイ化による相互結合の影響、アンテナ入力端の低損失化、物体検知の数値的、実験的検討を行い、システム化に向けての基礎基礎データを示した。

研究成果の概要(英文)：To construct a detecting system of the object position, leaky-wave antennas which can perform one-directional beam scanning due to frequency have been investigated. This research has treated two guiding structures of composite right/left handed transmission lines which can radiate from forward direction to backward one continuously. In planar guides, a new unit cell have been developed to controll the frequency fulfilling the balanced condition, while in metal waveguides, a unit cell using new field distributions of the cutoff TE and TM modes has been developed. Their usefulness has been verified from measurements. Furthermore, numerical and experimental investigations of interactive coupling between adjacent leaky-wave antennas, low reflection loss at the input port and also object detection has been performed, thereby giving the basic data to construct the system.

研究分野：電磁波工学

キーワード：漏洩波アンテナ

1. 研究開始当初の背景

近年、ミリ波を利用した通信やセンシングが盛んになってきており、種々の分野で研究開発が進められている。たとえば、ミリ波を用いたLAN、自動車搭載の障害物レーダ、光波では遮蔽されて見ることができない物体内部に存在する金属探知用イメージング、あるいは容器内の温度、圧力、ガス、蒸気などに影響されずに非接触での計測を可能とするレベル計やレベルスイッチなどがその代表的なものである。申請者はこれらのシステムを構築する重要な素子の1つであるアンテナ単体について、スタブ装荷リッジリーキー導波管構造のアンテナ(科学研究費:平成16年度終了)および人工媒質を用いた右手系/左手系複合伝送線路構造のリーキー波アンテナ(科学研究費:平成22年度終了)を開発してきた。この種のアンテナは伝送線路上の一部にスロットやパッチなどの放射機構を設けて電磁波の放射を促すのではなく、伝送線路に何も付加的構造を設けない様線路上のリーキー波を利用するものである。この種のアンテナの利点は周波数数掃引により1軸方向のビーム走査が容易に行えることであり、アンテナのアレイ化により2次元走査を行えば、簡易なシステムにより位置情報検出が期待できる状況にあった。

2. 研究の目的

このような状況を踏まえ、申請者の開発したスタブ装荷リーキー導波管および右手系/左手系複合伝送線路で構成されたリーキー波アンテナを基にミリ波による物体の位置検出システムに適したアンテナの開発を行い、システム基盤の確立を図ることを目的としている。そのために、2次元走査に必要なリーキー波アンテナのアレイ化の検討ならびに信号検出時に問題となる入力端での反射波低減の検討も行い、システムの実用化に向けて研究を遂行する。

また、これらと並行して、リーキー波アンテナをシステムとして動作させるために必要となるフィルタ等の周辺回路の開発を行うことも目的の1つである。

3. 研究の方法

(1)右手系/左手系複合線路アンテナ

これまでに申請者が開発してきた右手系/左手系複合マイクロストリップ線路について周波数掃引によるビーム走査が後方から前方放射へと連続的に行える線路系形状、いわゆるバランス条件を満たす形状の開発を行う。その際、バランス点となる周波数の制御が容易に行える形状を主眼におく。

開発したアンテナの妥当性を検証するためにマイクロ波帯においてアンテナを試作し、漏洩波の放射特性の測定を行う。

マイクロストリップ線路の奇モードを用いるこの種の線路では入力端での不整合が位置検出システムの性能を左右することがか

ら、入力部の形状についての数値的、実験的検討を行う。

平面回路線路タイプだけでなく、導波管タイプにおいても右手系/左手系複合線路の開発を円形および方形導波管について行う。

開発した導波管の伝送特性を明らかにするとともに、バランス条件を満たす形状について検討を行う。

導波管壁にスリット開口を設けたリーキー波アンテナの構造を用い、その放射特性を明らかにする。

円形導波管についてはマイクロ波帯において複合線路を試作し、その妥当性を実験的に検証する。その際には、入力端での整合についても詳細な検討を行う。

(2)システム化に向けての検討

2次元走査を行うためのアンテナのアレイ化において考慮が必要となる隣接アンテナ間の相互結合について検討を行い、アンテナ設計法の確立を図る。

スタブ装荷リーキー導波管を用いたシステムを考慮して、入力端での反射損を-40dB以下に抑える励振法の検討を行う。

レーダ方程式を基にした近似式を用いて方形導体片からの反射検出電力のシミュレーションを行い、位置検出性能について検討する。

ミリ波帯にてアンテナを試作し、物体検出についての実験的検討を行う。

4. 研究成果

(1)右手系/左手系複合線路アンテナ

平面回路線路タイプ

マイクロストリップ線路の奇モードに基づく右手系/左手系複合線路の基本形状並びに本研究で開発された単位セルのストリップ形状を示したのが図1である。図(b)の形状において形状寸法 b, c のみを変化させたときの分散特性を示したのが図2であり、バランス条件を保ちつつ、バランス点の周波数を制御できることが明らかである。バランス条件を保つ b, c の関係を特性曲線で示したのが図3であり、バランス条件を満たすアンテナ設計が容易に行えることがわかる。

図4は $c=4.0\text{mm}$ として試作した27周期のリーキー波アンテナの写真であり、放射特性の最大放射方向の角度の測定値を理論値(位相定数およびHFSSから求めた値)とともにプロットしたのが図5である。図よ

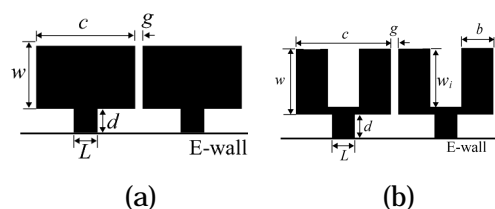


図1 (a)基本形状 (b)開発形状

り測定値と理論値はよく一致しており、周波数掃引により後方から前方に連続的にビーム走査が行えていることが実験的にも検証できた。

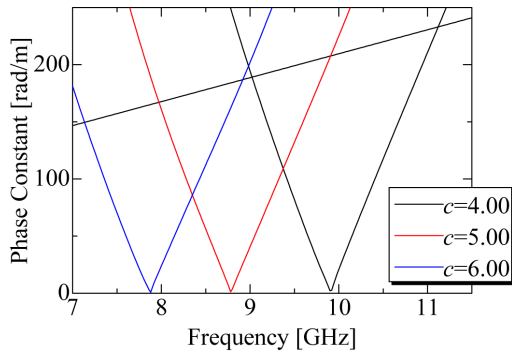


図2 バランス条件を満たす分散特性

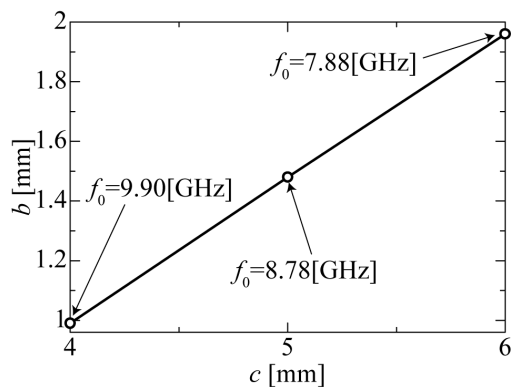


図3 バランス条件を満たす特性曲線

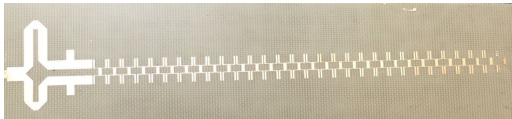


図4 試作アンテナの写真

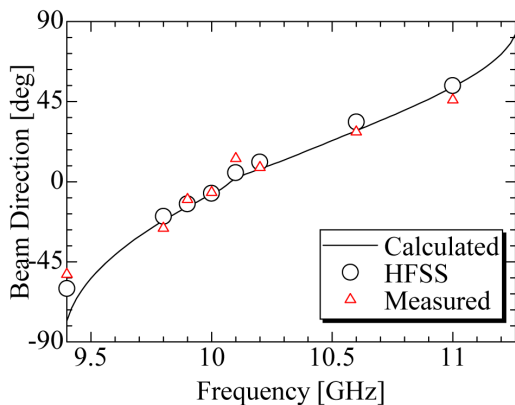


図5 最大放射方向の角度の測定結果

導波管タイプ

導波管を用いて右手系/左手系複合線路を構成するには、TEおよびTM遮断モードがそれぞれ並列インダクタンスおよび直列キャパシタンスを装荷した伝送線路とみなせ

ることを用いる。すなわち両遮断モードが存在する線路区間を順に縦続接続すればよい。ここで問題となるのは、両モードの電磁界分布の違いによる接続面での不整合ならびに両モードの遮断周波数のずれである。円形導波管の場合、不整合については隔壁導体板で導波管を4分割した扇形導波管のTE基本モードを用いれば、その電磁界分布は TM_{01} モードの電磁界分布に非常に近くなり、接続面での反射の影響は無視できる。一方、遮断周波数の制御については扇形導波管にリッジを設けることで、両者の遮断周波数を一致させることができ、バランス条件を満たす複合線路の構成が可能となる。図6は開発した複合線路の単位セル構造を示したものであり、リッジの高さ h を変化させた場合の分散特性を図7に示す。図より $h=4.5\text{mm}$ のとき、バランス条件を満たすことがわかる。図8は単位セルを12周期接続したときの伝送特性を示したもので、左手系領域から右手系領域にわたり、連続的に切れ目なく電磁波が伝搬していることがわかる。

リーキー波アンテナとするために導波管壁にスリット開口を設けた1例を図9に、またアンテナ全体の構造を図10に示し、その時の放射特性を図11に示す。周波数を掃引することによりビーム走査が行えていることが図から明らかである。なお、方形導波管についてもTE, TM遮断モード用いて円形導波管の場合と同様に右手系/左手系複合線路を構成できることを明らかにしている。

(2) システム化に向けての検討

2次元走査を行うためのアンテナのアレイ化において考慮が必要となる隣接アンテナ間の相互結合についてスタブ装荷リーキー波アンテナを例に検討を行ったのが図12である。図12ではリーキー波アンテナを平行に配置したときの開口を介しての隣接線路への結合電力を求めたものであり、線路間隔 d をパラメータに取っている。 d を大きくとり間隔を広くすると結合電力が弱くなっていく様子が示されているが、最小限の間隔の場合でも結合電力 S_{31} は-40dB以下となっている、それゆえ、この種のアンテナのアレイ化の設計は相互結合を考慮することなく、アレイファクターにより行えばよいと結論づけられる。

次にスタブ装荷リーキー導波管を用いたシステムを考慮して入力端での反射損を-40dB以下に抑える励振法について検討した結果、この種のアンテナの特徴であるスタブ線路の非対称配置を活かした励振法として図13を開発した。図に示すように通常の導波管からの変換において、スタブ線路が導波管中央に対称には配置されている場合にはスタブ線路からの漏洩は生じないことから、導波管からスタブ線路導波管への変換は対

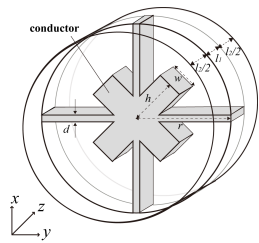


図6 単位セル構造

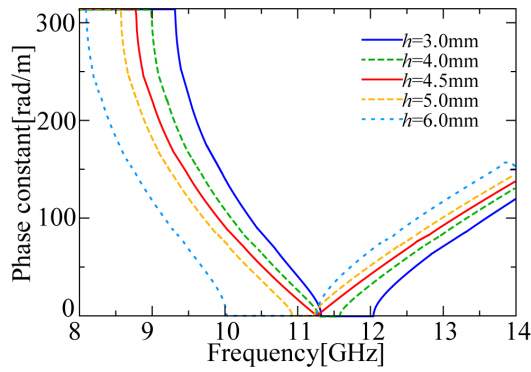


図7 分散特性

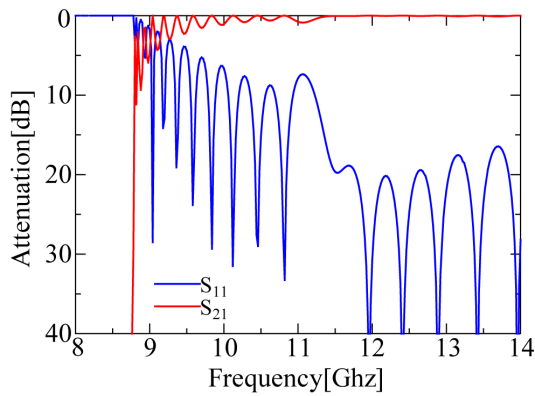


図8 12周期接続時の伝送特性

称位置から非対称位置にある仕様の幅まで開口をテーパ状に広げていけば、反射損の少ない励振が可能となる。図14は実際に反射損を求めたものであり、従来の励振法の場合は-20dB近くであったのが、本励振法の場合には-40dB以下に抑制することが可能となった。

レーダ方程式を基にした近似式を用いて方形導体片からの反射検出電力のシミュレーションを行った結果、使用するアンテナにおいては、50GHz帯で10mm角の導体片を検知できる最大距離は260mmとなった。この値をもとにHFSSを用いて検出出力を求めたのが図15である。物体はアンテナから250mmの位置に置き、物体として10mmおよび20mm角の導体片を用いている。導体片の検出が可能なが示されている。

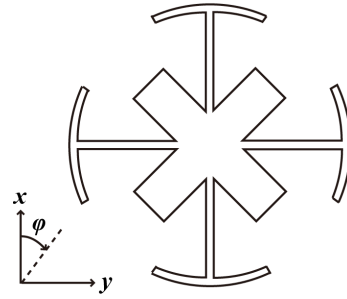


図9 管壁のスリット形状

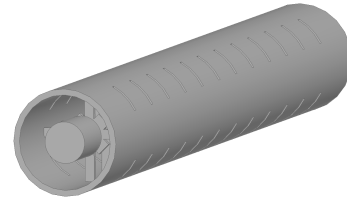


図10 アンテナ構造

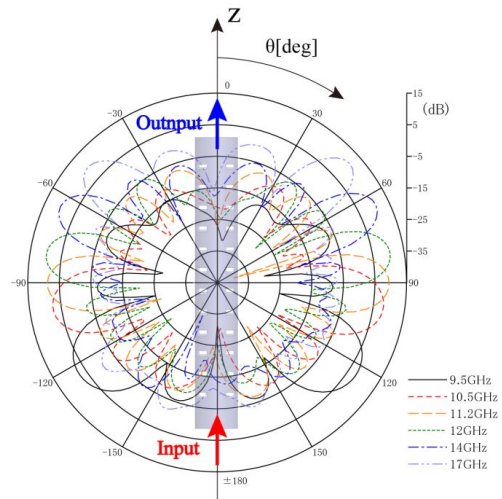


図11 放射特性

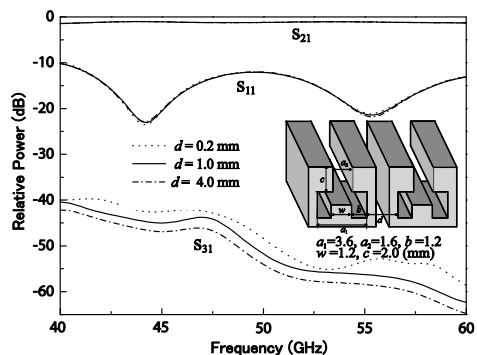


図12 相互結合特性

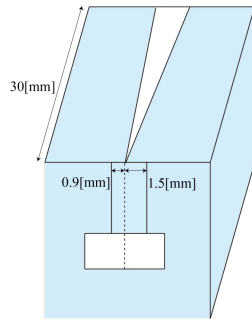


図 13 励振部構造

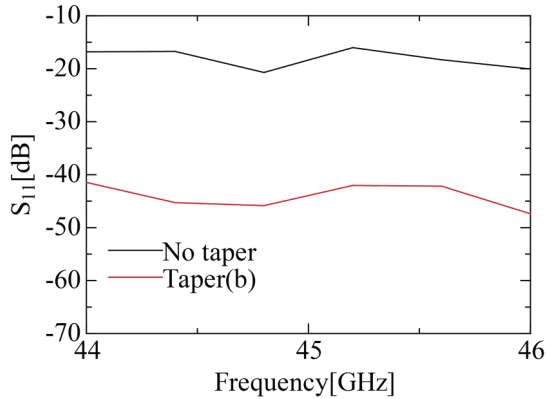
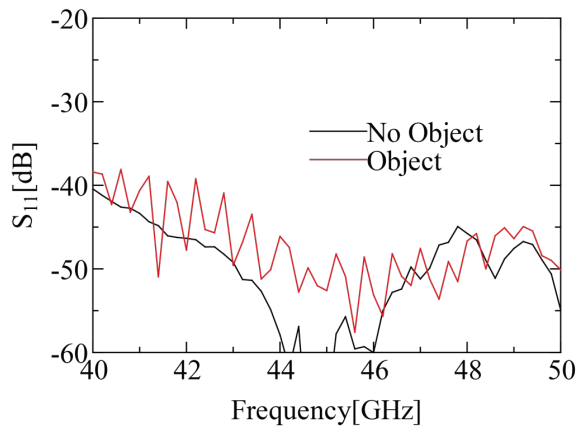
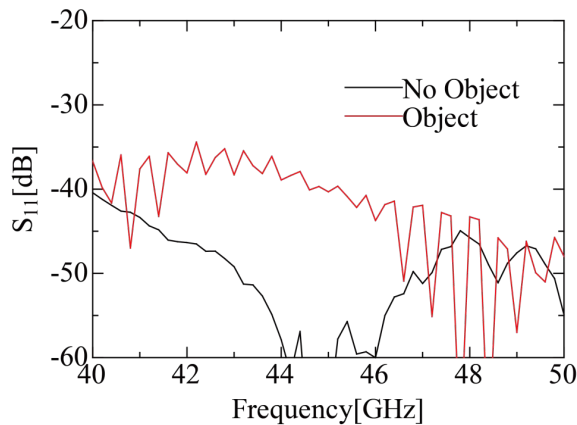


図 14 反射損失の比較



(a) 10mm 角



(b) 20mm 角

図 15 検知出力

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

Daichi Higashi, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji, Reflectarray resonant elements for linear to circular polarization conversion, IEICE Communications Express, 査読有, Vol. 5, 2016,

DOI:10.1587/comex.2016XML0035

Shigeyuki Nishimura, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji, Transmission characteristic on a partially ridge-loaded composite right/left-handed cylindrical waveguide, Proceedings of Intern. Conf. on Electromag. In Advanced Appl., 査読有, Vol. 1, 2015, pp. 863-866.

DOI: 10.1109/ICEAA.2015.7297236

Daichi Higashi, Shusuke. Sasaki, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji, Low cross-polarization reflectarray elements with four axial symmetry for dual-polarization and wideband use, IEEE AP-S Intern'l Symp. Digest, 査読有, 2015, pp. 2171-2172,

DOI: 10.1109/APS.2015.7305474

Shigeyuki Nishimura, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji, Radiation characteristics in new CRLH cylindrical waveguides, Proceeding of IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 査読有, 2015, pp. 364-366,

DOI: 10.1109/APCAP.2015.7374400

Daichi Higashi, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji, Low cross-polarization reflectarray elements with four axial symmetry for dual-polarization use, IEICE Communications Express, 査読有, Vol.4, No. 3, 2015, pp.85-88,

DOI:10.1587/comex..4.85

Daiki Goto, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji, Novel right/left handed transmission lines keeping the balanced condition, Proceeding of Asia Pacific Microwave Conference, 査読有, 2014, pp. 1235-1237,

DOI: 10.1109/APMC.2014.6695210

Wei Song, Hiroyuki Deguchi, Mikio Tsuji, A harmonic suppression and size-reduced rat-race hybrid coupler ring dual coupled-lines, 査読有, 2012, pp. 1083- 1089, DOI: 10.1578/elex.9.1083

〔学会発表〕(計 25 件)

竹内裕太, 出口博之, 辻幹男, 多層平面構造 UWB フィルタの通過域特性の改善について, 電子情報通信学会総合大会, 2016 年 3 月 16 日, 九州大学伊都キャンパス, 福岡市

鶴山和哉, 西村茂幸, 出口博之, 辻幹男, 遮断 TM モード及び H 型仕切り板装荷遮断 TE モードによるバランス型 CRLH 方形導波管の伝送特性, 電子情報通信学会総合

大会, 2016年3月15日, 九州大学伊都
キャンパス, 福岡市
西村茂幸, 出口博之, 辻幹男, リッジ装
荷右手/左手系円筒導波管を用いた漏洩
波アンテナによる放射特性の検討, 電気
学会電磁界理論研究会, 2016年1月28
日, 神戸市産業振興センター, 神戸市
西村茂幸, 出口博之, 辻幹男, 右手/左手
系複合円筒導波管の伝送特性, 電子情報
通信学会マイクロ波研究会, 2015年5月
28日, 電気通信大学(東京都), 調布市
田中登世一, 出口博之, 辻幹男, 複数ス
タブ及びスロット装荷によるラットレ
ース回路の不要応答抑制, 電子情報通信学
会マイクロ波研究会, 2015年3月5日,
福井大学, 福井市
横大路敬介, 出口博之, 辻幹男, デュア
ルバンドを持つUWBフィルタのスロット
及びパッチ形状について, 電子情報通信
学会マイクロ波研究会, 2014年12月18
日, 青山学院大学, 東京都
後藤大輝, 出口博之, 辻幹男, バランス
条件を保持するCRLH-TL単位セル設計,
電子情報通信学会通信ソサイエティ大会,
2014年9月25日, 徳島大学常三島キャン
パス, 徳島市
杉本雄紀, 植田達哉, 出口博之, 辻幹男, オ
ープンループマイクロストリップ共振器
を用いた帯域通過フィルタのCul-de-Sac
結合行列に基づく設計, 電子情報通信学
会マイクロ波研究会, 2014年5月22日,
同志社大学今出川キャンパス, 京都市
浅田 智也, 出口博之, 辻幹男, 低交差
偏波特性を有するリフレクトアレー用任
意形状素子の最適化について, 電気学会
電磁界理論研究会, 2013年11月14日,
星野リゾート, 青森県
網本秀一, 出口博之, 辻幹男, 結合スロ
ットに導体を挿入した二層マイクロスト
リップ線路方向性結合器の広帯域化につ
いて, 電子情報通信学会総合大会, 2013
年3月20日, 岐阜大学, 岐阜市

横田 健太郎 (YOKOTA, Kentaro)
網本 秀一 (AMIMOTO, Shuichi)
向野下 佳江 (MUKAINOGE, Yoshie)
明石 卓也 (AKASHI, Takuya)
横大路敬介 (YOKOJI, Keisuke)
後藤 大輝 (GOTO, Daiki)
苗村 拓也 (NAEMURA, Takuya)
植田 達哉 (UEDA, Tatsuya)
吉田 達哉 (YOSHIDA, Tatsuya)
西村 茂幸 (NISHIMURA, Shigeyuki)
東 大智 (HIGASHI, Daichi)
田中登世一 (TANAKA, Toyokazu)
鶴山 和哉 (UYAMA, Kazuya)
竹内 裕太 (TAKEUCHI, Yuta)

〔その他〕

研究室ホームページ

[http://www1.doshisha.ac.jp/~hdeguchi/i
ndex.html](http://www1.doshisha.ac.jp/~hdeguchi/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 幹男 (TSUJ, Mikio)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 50148376

(2) 研究協力者

Wei Song
浅田 智也 (ASADA, Tomoya)
杉本 雄紀 (SUGIMOTO, Yuki)