

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560533

研究課題名(和文) 距離0mからの超近距離と対象物・マイクロホンの移動に対応した音響測距法

研究課題名(英文) Acoustic distance measurement method measurable from 0 m and applicable to movement of target or microphone

研究代表者

中迫 昇 (NAKASAKO, Noboru)

近畿大学・生物理工学部・教授

研究者番号：90188920

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、介護・福祉用ロボットのように人間に接するか接しないかの近距離の検出が必要な機器に対し、可聴音を用いて距離を検知する測距システムを実現することにある。(1)すでに提案されている可聴音域での定在波(位相干渉)を用いた距離推定に関して、様々な工夫を施し、性能の向上を図るとともに実際の応用の可能性を検討した。(2)最小探知距離は送信波の帯域幅により定まるが、より近距離を測定するための方法を検討した。また、(3)従来の測距法は対象物の移動を考慮していないが、移動体の距離と速度の測定が可能な原理的手法を提案し、対象物とマイクロホンの両方が移動する場合に対する測距の可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to realize the distance measuring system for detecting the distance by using the audible sound, especially in a close range (e.g., where a nursing-care robot care for human). (1) Based on the previously proposed acoustic distance measurement method (ADM) using a standing wave (or phase interference), we improved the original ADM method, and we considered the properties and potentials of the improved ADM method. (2) We considered ADM method to measure the distance shorter than the minimum measurable distance which is defined by the bandwidth of transmitted signal. Furthermore, (3) we considered the principle method for the moving target though the original ADM method is not applicable to the moving target. Thus, it becomes possible to measure both the velocity and distance for the moving target. This implies that the distance between microphone and target is measurable even in a case when both microphone and target are moving.

研究分野：計測工学

キーワード：パワースペクトル 位相干渉 定在波 対象物 移動 距離スペクトル 距離0mからの超近距離 音響測距

1. 研究開始当初の背景

寝たきりの老人や四肢に障害をもつ患者さんに対するケアを行うための介護・福祉用ロボットの開発が広く行われているが、産業用ロボットとは異なり、相手が人間であるということに特に注意しなければならない。たとえば、ロボットの手からコップで患者さんに水を飲ませる場合、患者さんとの距離を素早く正確に推定しなければ時に危険すら伴う。研究代表者はすでに送信波と対象物から跳ね返ってくる反射波の間の位相干渉（定在波）に基づく距離推定法（以下、測距法）を提案している。

しかしながら、人間は反射係数が小さく反射波が微弱である、人間とマイクロホンが静止しているだけでなく移動することもある、従来手法の最小探知距離は送信波の帯域幅に依存するためより近距離を測定するには帯域幅を広げる必要があるなど様々な問題があり、それらを克服する新たな理論を開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、介護・福祉用ロボットのように人間に接するか接しないかのぎりぎりの距離の検出が必要な機器に対し、可聴音を用いてロボットから人間までの距離を検知するための測距システムを実現することにある。すなわち、従来法では、原理的に最小探知距離は送信波の帯域幅によって制限されており、対象物やマイクロホンも基本的には静止した状態を想定していたが、本研究では、(1)すでに提案されている可聴音域での位相干渉（定在波）を用いた距離推定に関して、様々な工夫を施し、性能の向上を図るとともに実際的な応用の可能性を検討する。(2)最小探知距離は送信波の帯域幅により定まるが、より近距離を測定するための方法を検討する。また、(3)従来の測距法は対象物の移動を考慮していないが、移動体の距離と速度の測定が可能な原理的手法を検討する。

3. 研究の方法

まず、研究の基本である位相干渉に基づく音響測距法について簡単にまとめておく。

話を簡単にするため、送信波として、周波数帯域 $[f_1, f_N]$ 内で一様なパワースペクトルをもつ信号を考える。このような信号は、各周波数での位相を揃えると、時間領域ではパルス波形となる。

いま、この信号を対象物に向け送信するとき、入射波が対象物によって反射され、マイクロホンでの観測波形は入射波と反射波の合成波となり、位相干渉を生じる。マイクロホン位置において観測された合成波を、フーリエ変換により周波数領域へ変換する。このとき、観測波形（合成波形）のパワースペクトルは周期的に変化し、その周期は対象までの距離によって変化する。したがって、パワースペクトルをもう一度フーリエ変換することにより対象までの距離が推定できるのである。

ースペクトルをもう一度フーリエ変換することにより対象までの距離が推定できるのである。

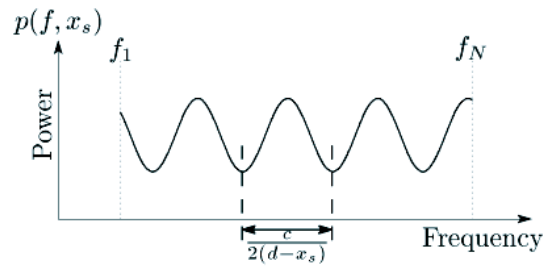


図1 観測信号のパワースペクトル

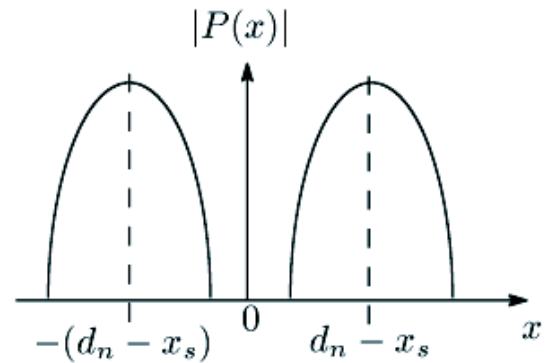
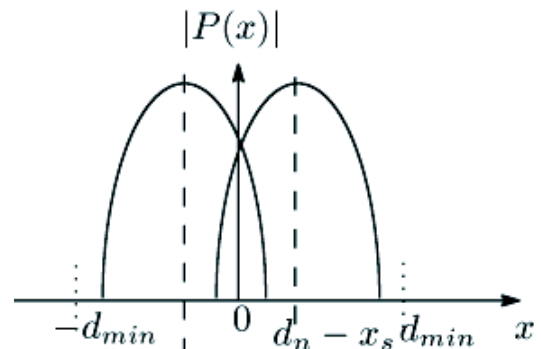
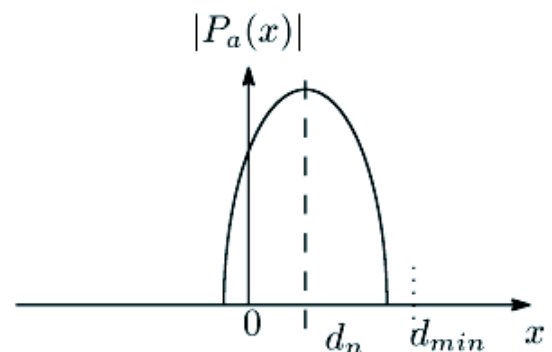


図2 距離スペクトル



(a) 従来法



(b) 提案法

図3 近距離の対象物に対する距離スペクトル

距離 d の位置に対象物が存在する場合、マイクロホン位置を $x = x_s$ として観測されるパワースペクトル $p(f, x_s)$ を図1に示す。

ここで、 c は音速である。このパワースペクトルは周期的に変化し、その周期はマイクロホンから対象までの距離 $d - x_s$ に逆比例する。パワースペクトルをさらにフーリエ変換した結果を図2に示す。このスペクトル $P(x)$ の絶対値 $|P(x)|$ が距離のスペクトルとなり、そのピーク位置がマイクロホンから対象物までの距離 $d - x_s$ の推定値となる。しかし対象物(人間など)が最小探知距離 d_{min} より短い距離に存在すると、パワースペクトルが実関数であることから、それをフーリエ変換した距離スペクトルは図3(a)のようになり、負の距離のスペクトルと重畳して正しい距離を推定できない。

対象物が人間の場合には、反射係数が小さく反射波が微弱であり、静止しているだけでなく通常は移動するため、距離の推定は困難である。さらに、従来手法の最小探知距離は送信波の帯域幅に依存するため、より近距離を測定するには帯域幅を広げる必要があり、とくに人間と接触する限界の距離 $0m$ 付近の推定は原理的に不可能であった。

また、距離を測定する際に、実環境においては環境雑音に反射波が埋もれることから測定が困難になったり、測定系(スピーカからマイクロホンに至る経路)の影響により、距離スペクトルの $0m$ 付近に偽のピークが生じたりする。さらに、測定対象や測定装置(マイクロホンなど)は静止しているだけではなく、移動することもしばしばである。移動する物体・マイクロホンに対しては、ドップラー効果が無視できない場合もある。

上述の位相干渉に基づく音響測距法をもとに、研究の3つの目的:(1)対象物(最終的には人間を想定)の距離推定において、位相干渉に基づく音響測距法の性質と応用の可能性、(2)パワースペクトルの代わりに複素解析関数の導入により、そのフーリエ変換から求める距離スペクトル $|Pa(x)|$ (図3(b)参照)を用いた最小探知距離の短縮、(3)物体・マイクロホンの移動が音響測距法に及ぼす影響と距離・速度の測定法、に沿いながら、新たな音響測距法の開発に向けて、様々な検討を行なった。

研究の方法としては、いずれの目的に対しても、まず理論を構築し、シミュレーションや予備実験を経て理論を修正したのち、実際の音場に適用して理論の実際的な有効性を確認するようにしている。

4. 研究成果

研究期間の3年間に様々な成果を得た。研究の3つの目的に沿って説明する。

(1)位相干渉に基づく音響測距法の性質と応用の可能性:研究の基本となる位相干渉に基づく音響測距法は観測信号のパワースペ

クトルの変化分にもう一度フーリエ変換を施し距離スペクトルを求める簡単な手法であり、その原理についてはすでに知られている。最終的にはロボットと人間の間の距離測定などを視野に入れて、音響測距法の性質と応用の可能性を探った。1chマイクロホンによる観測信号のパワースペクトルの代わりに、2chマイクロホンの観測信号のクロススペクトルを求め、その変化分のフーリエ変換から距離スペクトルを求めることができた(Nakayama et.al., Acoust. Sci. & Tech., 34, 197-205, 2013; Nakayama et.al., Proc. of ICASSP2013, 423-427, 2013)。2chマイクロホンを近接に設置することにより、音源の影響とスピーカからマイクロホンまでの測定系の影響を低減することが可能と思われる。なお、1chマイクロホンだけを用いた測定系の影響の実用的な除去法としては、観測信号のパワースペクトルの隣接する成分間の商を求め、その変化分のフーリエ変換から距離スペクトルを求めることができた(N. Nakasako et.al., ICSV '21, 2014, (CD-ROM収録のpp.1-8))。また、2chマイクロホンを2組用意することにより音響測距法を用いて、対象物までの距離だけでなく位置の測定法を提案した(鈴木和博他, 信学論 A, J97, 343-346)。従来の音響測距法は、送受信波が平面波という仮定の下、反射係数が未知の場合でも距離スペクトルのピーク位置からマイクロホンと対象物間の距離を求めることができた。逆に、距離スペクトルからマイクロホン位置における送受信波の比(等価的な反射係数と呼ぶ)を推定する手法を提案した(N. Nakasako et al., Proc. of INTER-NOISE 2014 (CD-ROM収録のpp.1-8))。

音響測距法は音を使って対象物までの距離を測定する方法であるが、介護用ロボットなどに実装する場合には音源として合成音声を利用できることから、音源として音声を利用した音響測距法を検討した(M. Nakayama et al., Proc. of ICSPCC2012, 2012(CD-ROM収録のpp.1-6))。実環境下の音響測距において、環境雑音は大敵である。そこで、雑音対策として同期加算を導入し、1ch音響測距(中迫昇 他、電学論 C, 134, 1926-1927, 2014)あるいは2ch音響測距(K. Suzuki et.al., ICSV '21, 2014, (CD-ROM収録のpp.1-8))における耐雑音性能の向上を図った。

(2)最小探知距離よりも短い距離の測定:位相干渉に基づく音響測距法では、最小探知距離は送信波の帯域幅に依存し、最小探知距離を短くするためには帯域幅の広い送信波を用いる必要があった。その原因として、位相干渉に基づく測距法はパワースペクトルという実関数のフーリエ変換を用いている

ために、距離スペクトルにおいて、正負の距離成分が軸対象に現れるが、とくに最小探知距離未満では正負の距離成分が干渉し合い、正確な距離を求めることができない。そこで、パワースペクトルの代わりに解析信号を導入し、そのフーリエ変換として求まる距離スペクトルでは負の距離成分が除去される。すでに2つのマイクロホンを用いた方法は知られているが、1ch 観測信号のみから複素数の解析信号の実部・虚部（あるいは振幅と位相）を求める手法を提案した（中迫昇 他、電学論 C, 132, 1749-1755, 2012; Nakasako et.al., Proc. of ICSPCC2012, 2012(CD-ROM 収録の pp.1-6)）。これにより、接触するかしないかのぎりぎりの距離まで、すなわち 0m の距離まで測定可能となった。

(3) 物体・マイクロホンの移動が音響測距法に及ぼす影響と距離・速度の測定法：対象物や測定系は常に静止しているとは限らない。音響測距システムを介護用ロボットなどに実装することを想定し、対象物でなくマイクロホンやスピーカといった測定系の移動をまず考える。この場合には、ロボット(測定系)が移動することを逆手に取り、音源の影響とスピーカからマイクロホンまでの測定系の影響を低減することが可能である。すなわち、1ch マイクロホンが微小距離動いたとして、移動前後の観測信号のパワースペクトルの比を求め、その変化分のフーリエ変換から距離スペクトルを求めることができ(N. Nakasako et.al., ISPACS2013, 332-335, 2013)、プロトタイプロボットハンドにも実装を試みた(N. Yamawaki et.al., ISPACS2013, 336-339, 2013)。移動物体の測距に関して、帯域分割した送信波を用いて位相干渉に基づく音響測距法を適用することにより、移動体の距離と速度の推定が原理的に可能であることが分かった(中山雅人他、電学論 C, 132, 1774-1775, 2012)。これにより、対象物とマイクロホンの両方が移動する場合に対する測距の可能性が示唆された。

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 14 件)

N. Nakasako, Y. Neki, M. Nakayama, T. Shinohara and T. Uebo, A trial on calculating the equivalent reflection coefficient by acoustic distance measurement method based on phase interference in the actual sound field, Proc. of the 43rd International Congress on Noise Control Engineering (inter-noise 2014), 1-8(CD-ROM 収録), 2014, 査読無

中迫昇, 英慎平, 篠原寿広, 中山雅人, 上保徹志, リニアチャープ音の干渉

に基づく音響測距法 - 雑音環境下における性能評価と雑音対策の試み -, 電気学会論文誌 C, 134(11), 1926-1927 2014, 査読有

K. Suzuki, N. Nakasako, M. Nakayama, T. Shinohara and T. Uebo, Robust acoustic distance measurement method based on synchronous addition using cross-spectral method for use in a noisy environment, Proc. on the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21), 1-8(CD-ROM 収録), 2014, 査読無

N. Nakasako, Y. Neki, M. Nakayama, T. Shinohara and T. Uebo, Effect of a measurement system on 1ch acoustic distance measurement based on phase interference and its correction by considering adjacent frequency components of the power spectrum, Proc. on the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21), 1-8(CD-ROM 収録), 2014, 査読無

鈴木和博, 中迫昇, 中山雅人, 篠原寿広, 上保徹志, 福島学, クロススペクトル法を用いた位相干渉に基づく音響測距法による対象物位置推定, 電子情報通信学会論文誌 A, J97-A(4), 343-346, 2014, 査読有

N. Nakasako, T. Shinohara, N. Yamawaki, T. Nishimae, M. Nakayama and T. Uebo, Fundamental consideration on 1ch acoustic distance measurement method based on phase interference by considering the movement of transmitting-and-receiving system, Proc. of the 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2013), 332-335, 2013 年, 査読有

N. Yamawaki, N. Nakasako, T. Nishimae, T. Shinohara, M. Nakayama and D. Yoshida, A prototype of BCI-robot arm system with 1ch acoustic distance measurement device, Proc. of the 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication System (ISPACS2013), 336-339, 2013, 査読有

M. Nakayama, N. Nakasako, K. Suzuki, Acoustic distance measurement method based on interference using the cross-spectral method with adjacent microphones, Proc. of the 38th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2013), 423-427, 2013 査読有

M. Nakayama, N. Nakasako, T. Uebo, and M. Fukushima, Acoustic distance

measurement method based on phase interference using the cross-spectral method, Acoustical Science and Technology, 34(3), 197-205, 2013 査読有

M. Nakayama, N. Nakasako, T. Nishiura, and Y. Yamashita, Multiple-nulls-steering beamformer based on both talker and noise direction-of-arrival estimation, Acoustical Science and Technology, 34(2), 80-88, 2013, 査読有

中迫昇, 篠原寿広, 河西慶治, 上保徹志, 可聴音の位相干渉を用いた 0m から測定可能な距離測定法, 電気学会論文誌 C 部門, 132(11), 1749-1755, 2012, 査読有

中山雅人, 根木佑真, 中迫昇, 篠原寿広, 上保徹志, 西浦敬信, 帯域分割した時間遅延インパルス音の位相干渉に基づく移動体の距離・速度推定法, 電気学会論文誌 C 部門, 132(11), 1774-1775, 2012, 査読有

N. Nakasako, T. Shinohara, K. Kawanishi, M. Nakayama, and T. Uebo, Acoustic distance measurement method measurable from 0 m based on the interference between transmitted and reflected waves using power and phase spectra of single channel observations, Proc. of the 2012 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC2012), 1-6(CD-ROM 収録), 2012, 査読有

M. Nakayama, Y. Neki, N. Nakasako, T. Uebo, and T. Nishiura, Acoustic distance measurement method based on interference of speech presented by a dialogue system, Proc. of the 2012 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC2012), 1-6(CD-ROM 収録), 2012, 査読有

〔学会発表〕(計 25 件)

鈴木和博, 中迫昇, 中山雅人, 篠原寿広, 上保徹志, クロススペクトル法を用いた位相干渉に基づく音響測距における近接音源の影響と移動平均による性能改善, 日本音響学会研究発表会, 2015 年 3 月 16 日, 中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区)

鈴木和博, 中迫昇, 中山雅人, 篠原寿広, 上保徹志, 位相干渉と直流成分の除去に基づく 0m から計測可能な 2ch 音響測距法, 平成 26 年度電気関係学会関西連合大会, 2014 年 11 月 23 日, 奈良先端科学技術大学院大学(奈良県生駒市)

鈴木和博, 中迫昇, 中山雅人, 篠原寿広,

上保徹志, 解析信号の導入による超近距離計測可能な位相干渉に基づく 2ch 音響測距法の検討, 日本音響学会研究発表会, 2014 年 9 月 3 日, 北海学園大学豊平キャンパス(札幌市豊平区)

中迫昇, 藤井裕雅, 篠原寿広, 中山雅人, 上保徹志, 解析信号導入による超近距離測定可能な位相干渉に基づく 1ch 音響測距法の小型システムへの一実装, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014 年 5 月 23 日, 京都テルサ(京都市南区)

根木佑真, 中迫昇, 中山雅人, 篠原寿広, 上保徹志, 位相干渉に基づく音響測距法による実音場の等価的な反射係数の算定の試み, 日本音響学会春季研究発表会, 2014 年 3 月 10 日, 日本大学理工学部駿河台キャンパス(東京都千代田区)

鈴木和博, 中迫昇, 中山雅人, 篠原寿広, 上保徹志, 福島学, 雑音環境下における雑音抑圧とクロススペクトル法を用いた位相干渉に基づく音響測距法, 日本音響学会春季研究発表会, 2014 年 3 月 10 日, 日本大学理工学部駿河台キャンパス(東京都千代田区)

中迫昇, 篠原寿広, 西前達矢, 中山雅人, 上保徹志, 位相干渉に基づく 1ch 音響測距法における送受信系の移動を考慮したバックグラウンド除去 ~ 基礎的検討とロボットセンサーへの応用 ~, 電子情報通信学会応用音響研究会, 2013 年 12 月 13 日, 金沢大学サテライトプラザ(石川県金沢市)

英慎平, 中迫昇, 篠原寿広, 中山雅人, 上保徹志, リニアチャープ音の干渉に基づく音響測距法 - 雑音環境下における基礎的検討 -, 平成 25 年電気関係学会関西支部連合大会, 2013 年 11 月 17 日, 大阪電気通信大学寝屋川キャンパス(大阪府寝屋川市)

鈴木和博, 中迫昇, 篠原寿広, 中山雅人, 上保徹志, 福島学, クロススペクトル法を用いた位相干渉に基づく音響測距における観測雑音の影響と一対策, 平成 25 年電気関係学会関西支部連合大会, 2013 年 11 月 16 日, 大阪電気通信大学寝屋川キャンパス(大阪府寝屋川市)

鈴木和博, 中迫昇, 篠原寿広, 中山雅人, 上保徹志, 福島学, 複数音源を利用したクロススペクトルの位相干渉に基づく対象物位置推定法の検討, 日本音響学会研究発表会, 2013 年 9 月 27 日, 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)

根木佑真, 中山雅人, 篠原寿広, 中迫昇, 上保徹志, 1ch 観測信号と疑似観測信号のクロススペクトルを利用した音響測距法の検討, 日本音響学会研究発表会, 2013 年 9 月 27 日, 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)

中迫昇, 西前達矢, 篠原寿広, 中山雅

人，上保徹志，送受信系の移動を考慮した位相干渉に基づく1ch音響測距法の基礎的検討，第58回システム制御情報学会研究発表講演会，2013年5月15日，兵庫県民会館（神戸市中央区）

根木佑真，中山雅人，篠原寿広，中迫昇，上保徹志，雑音環境下における雑音抑圧と情報提示音声の位相干渉に基づく音響測距法の検討，日本音響学会研究発表会，2013年3月13日，東京工科大学（東京都八王子市）

鈴木和博，中迫昇，篠原寿広，中山雅人，上保徹志，近藤善隆，福島学，クロススペクトル法を用いた位相干渉に基づく音響測距法による対象物位置推定の基礎的検討，日本音響学会研究発表会，2013年3月13日，東京工科大学（東京都八王子市）

英慎平，中迫昇，篠原寿広，中山雅人，上保徹志，対象物と送受音器の移動下におけるリニアチャープ音の干渉に基づく速度と距離の推定法 - 様々な移動方向に関する基礎的検討 - ，日本音響学会研究発表会，2013年3月13日，東京工科大学（東京都八王子市）

中迫昇，小泉裕司，篠原寿広，上保徹志，距離0mから測定可能な位相干渉に基づく1ch音響測距法の小型システムによる実現，日本音響学会研究発表会，2013年3月13日，東京工科大学（東京都八王子市）

根木佑真，中山雅人，篠原寿広，中迫昇，実環境雑音に対する情報提示音声の位相干渉に基づく音響測距法の評価，平成24年電気関係学会関西支部連合大会，2012年12月8日，関西大学（大阪府吹田市）

英慎平，中山雅人，篠原寿広，中迫昇，上保徹志，送受音器の移動を考慮した干渉に基づく距離と速度推定法の実験的検討，平成24年電気関係学会関西支部連合大会，2012年12月8日，関西大学（大阪府吹田市）

根木佑真，中山雅人，篠原寿広，中迫昇，雑音環境下における情報提示音声の位相干渉に基づく音響測距法 - SNRに応じたフレーム長変更による雑音対策の検討 - ，日本音響学会研究発表会，2012年9月20日，信州大学（長野県長野市）

中山雅人，中迫昇，根木佑真，上保徹志，西浦敬信，実環境下における情報提示音声の位相干渉に基づく音響測距法の検討，電子情報通信学会応用音響研究会，2012年5月24日，大阪大学中之島センター（大阪市北区）

他5件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中迫昇（NAKASAKO, Noboru）
近畿大学・生物理工学部・教授
研究者番号：90188920

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし