

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420372

研究課題名(和文)有限語長制約を考慮したデジタルフィルタの実現に関する基礎的研究

研究課題名(英文)Basic study on realization for digital filters under finite word-length constraints

研究代表者

福光 昌由(中本昌由)(Fukumitsu, Masayoshi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00403585

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、無限インパルス応答(IIR)デジタルフィルタおよびデジタル微分器の設計法について研究を行った。まず、重み付き最小二乗法を線形化した形で設計問題を定式化した。理想応答として、帯域通過特性と微分特性を想定することにより、問題の定式化において周波数上での離散化(周波数標本化)が不要となり、設計問題は凸関数である2次形式に帰着することができた。また、フィルタの極の最大値を特定の値で制約した上で、繰り返し最適化を用いずフィルタを設計する方法を開発した。さらに、この成果を利用し、フィルタを実数係数と準スパース係数(0, ±1係数)で設計する方法や離散値係数で設計する方法を開発した。

研究成果の概要(英文): In this work, we consider the design method for infinite impulse response (IIR) digital filters and digital differentiators. First, we formulate the filter design problem by linearizing the weighted least squared error criterion. We employ a multiband-response and differentiation-response as an ideal response. Then, the design problem can be expressed in a quadratic form (convex function) without requiring any frequency sampling. Furthermore, we develop a design algorithm which can specify the maximum pole radius without any iterative optimization. By utilizing the results above, we propose several more design methods for filters which have semi-sparse (0, 1, -1) coefficients or discrete coefficients.

研究分野：信号処理

キーワード：デジタルフィルタ デジタル微分器 ロバスト安定 スパース表現 離散最適化

1. 研究開始当初の背景

デジタルフィルタは、計測・制御、情報通信から福祉工学まで幅広く利用されている。例えば、制御系における制御量からの雑音成分除去、携帯電話の音声データをサンプリングする際のアンチエイリアシング、デジタル補聴器の特定帯域の増幅処理などである。デジタルフィルタは有限インパルス応答 (FIR) フィルタと無限インパルス応答 (IIR) フィルタに大別される。FIR フィルタは、係数に対称性を付加するだけで完全直線位相となる利点があり、さらに構造的に常に安定であることから、フィルタの「安定性」に対する配慮も無用である。こういった背景から、実用上、FIR フィルタはユーザに好まれる傾向にある。一方、IIR フィルタは、分子多項式と分母多項式で与えられた有理伝達関数によって、所望の振幅・位相を同時に近似する必要がある。また、安定性を実現するためにはフィルタの極 (分母の特性多項式の根) に制約を課す必要がある。そのため、設計問題が複雑な非線形問題となり、ユーザから敬遠される傾向にある。しかしながら、IIR フィルタは所望の特性 (応答) を近似するための次数が (FIR フィルタに比べて) 圧倒的に少ないという利点がある。そのため、IIR フィルタはフィルタリング処理を実行するために必要な遅延器と乗算器の数が FIR フィルタより格段に少ない。フィルタの遅延器が少ないということは、小型化、低コスト化の点から有利である。また、乗算器が少ないことは、低消費電力駆動化、高速駆動化を実現する点でも有利である。すなわち、IIR フィルタは、FIR フィルタに比べて「実現の困難さ」に難点があるものの、ハードウェア上で実現することを想定すれば、実現コスト、消費電力、処理の速さにおいて非常に魅力的なフィルタであると言える。こういった背景から、本研究課題において IIR フィルタの設計および実現問題に取り組むという構想に至った。

2. 研究の目的

IIR フィルタに関しては数多くの研究成果が発表されているが、大多数がフィルタの「設計」に関するものである。実際、IEEE の論文誌でも振幅と位相を同時近似可能でフィルタの安定制約を考慮した方法が多数提案されている。しかしこれらは、フィルタ係数を連続値で計算するものである。フィルタを実際のハードウェア上で「実現」する場合、連続値の係数をそのまま使用することはできず、指定された語長 (有限語長) で離散化するため、様々な問題が発生する。例えば、積和演算に起因した「丸め雑音」や加算器における桁あふれ「オーバーフロー」である。このように、フィルタを実際のシステム上で「実現」するためには、「設計」とは別に有限語長の制約を考慮する必要がある。こうい

った背景から、本研究課題では以下のような目的を設定する。まず、デジタルフィルタの設計問題をフィルタ係数に関して「2 次形式」になるように定式化する。さらに、フィルタの安定性については、有限語長の影響を考慮して、指定された安定余裕 (安定マージン) を持つような制約を課する。また、上記と平行して上述した丸め雑音やオーバーフローを効果的に抑圧する手法の開発を進める。ここでは、フィルタの「設計」だけでなく、有限語長の影響を想定した「実現」を視野に入れて目標を設定している。また、前述した様々な特性劣化を抑えるべく、フィルタの「設計」と「実現」を統合し、効率的な実現方法 (基礎理論) を確立することが目的である。

3. 研究の方法

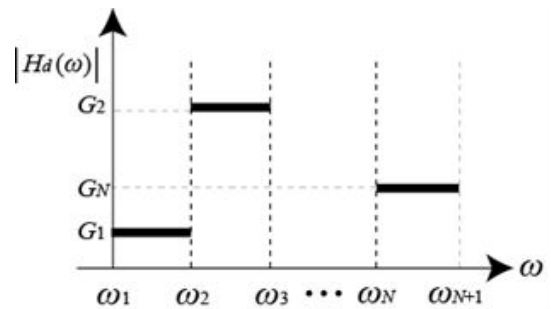
フィルタの設計は、下記のような伝達関数

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{\sum_{l=0}^n b_l z^{-l}}{\sum_{k=0}^m a_k z^{-k}}$$

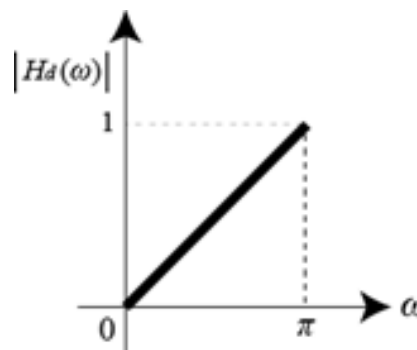
を定義し、所望応答 $H_d(\omega)$ と伝達関数のコスト関数

$$J(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int_0^\pi W(\omega) |H_d(\omega)A(\omega) - B(\omega)|^2 d\omega$$

を最小化する問題である。所望応答として、下図のようなマルチバンド特性を採用した。

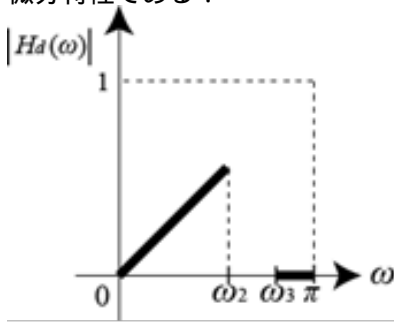


さらに、下図のような (全帯域) 微分特性についても考えた。



さらに、マルチバンド特性と微分特性を組み

合わせた帯域通過微分特性に拡張を試みた。下図は帯域通過微分の一種であるローパス微分特性である。



以上のように伝達関数と所望応答を定義し、所定の条件を満たすようにコスト関数 $J(a, b)$ を最小化する方法を利用した。

4. 研究成果

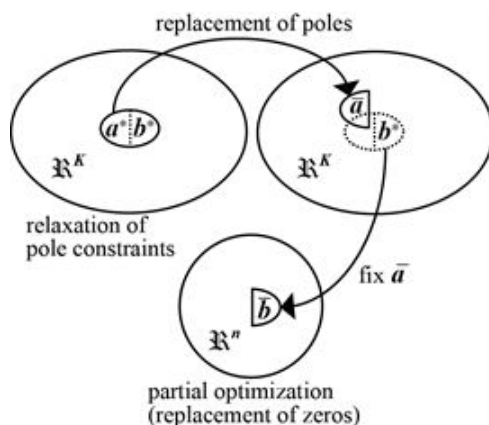
まず、問題の定式化においてコスト関数を

$$J(a, b) = a^T P a + 2a^T Q b + b^T R b$$

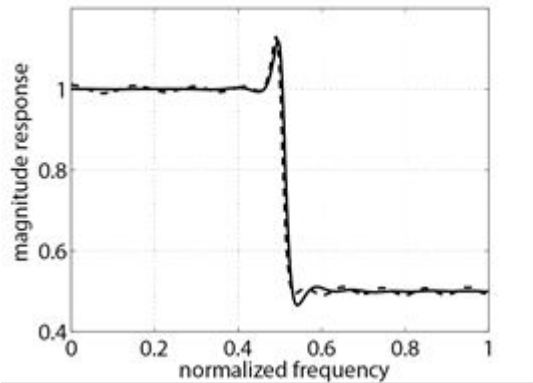
のように2次形式に帰着させることに成功した。しかも、コスト関数は可積分となり、各行列を計算する際には周波数サンプリングを必要としない。

最適化に関する成果として、導出した2次形式を最小化することにより、フィルタを設計する方法を提案した。この方法では、フィルタの極が指定された円内部に配置させること(最大極半径指定)ができる。したがって、ロバストな安定性が保証される。また、繰り返し最適化も必要としないので、収束性の保証なども不用であり非常に使い勝手のよい方法である。この方法は、まずフィルタの制約を分母多項式の初項(分母ベクトルの第1要素)が1になる制約のみを用いて分母係数と分子係数を計算する。このとき、まだ安定性は保証されていないので、指定された円外に極が現れることがある。このとき、指定された円外の極を、原点に向かって移動させ、円の上に配置する。

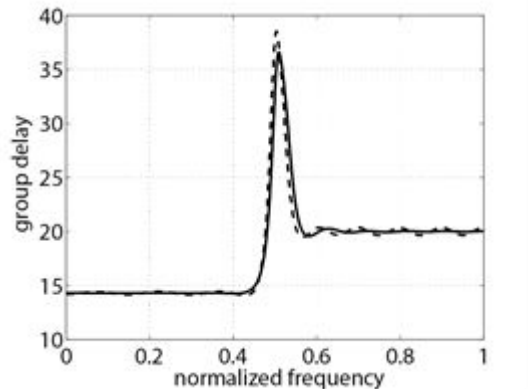
このようにして、極を再配置し、再度分母係数を計算する。この分母係数を固定した上で分子係数を再計算するのが我々の提案した方法である。この方法の概略を下図に示す。



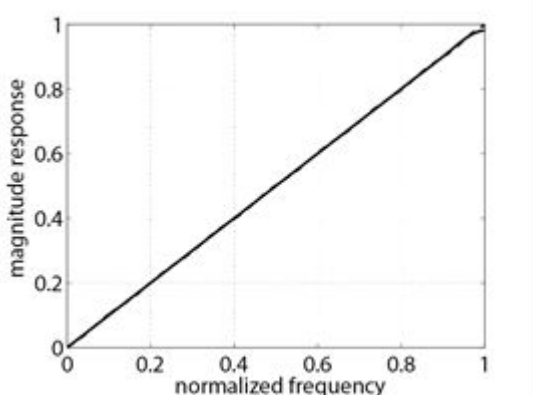
本設計法の特筆すべき点は、周波数サンプリングを必要としない、最大極半径が指定可能、繰り返し最適化を必要としない点にある。また、ロバスト安定であることは、コスト関数を2次形式で記述できたことは、フィルタ係数を有限語長で離散最適化する場合や実数と0または±1係数が混在したフィルタ(準スパースフィルタ)を設計する上でも有利である。設計例として、2バンドフィルタを設計した結果は以下ようになる。まず、振幅特性は下図のように得られた。



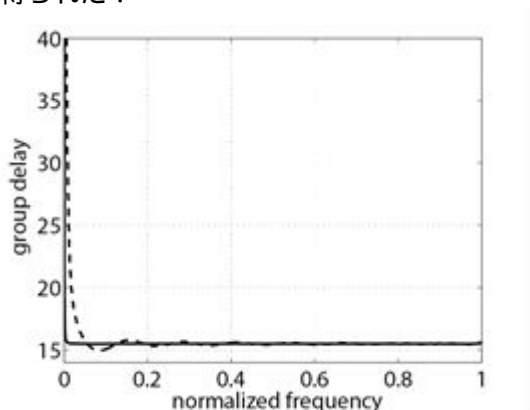
実線が提案手法であり、破線は2010年のIEEE論文誌に掲載された別グループの手法である。同様に、位相特性を下図に示す。



位相特性も途中で群遅延が変更されていても良好な結果が得られていることが確認できる。提案手法は周波数サンプリングや繰り返し最適化を必要としないにもかかわらず、従来法とほぼ同等の特性が得られている。さらに微分フィルタの設計結果を下図に示す。まず、振幅特性は以下のように得られた。



この場合も、先の 2 バンドフィルタと同様、良好な結果が得られていることが確認できた。また、微分器の位相特性も下図のように得られた。



さらに、これらを利用または拡張し、以下の成果が得られた。

(1) 全体帯域微分器をより一般化した帯域通過微分器についても周波数サンプリングを不要な形で設計問題の定式化を行い、同様な結果が得られた。

(2) フィルタ係数が実数の他に 0 または ± 1 になるよぶな準スパースフィルタの設計法も開発した。ここでは、0 または ± 1 係数の選択を分枝限定法により探索することで効率的な設計が可能となる方法を開発した。

(3) GA 等のヒューリスティクス探索法を用いて、フィルタ係数を有限語長で設計する方法を確立した。ここでは、先に提案した方法で最大極半径指定することによって「安定余裕」を確保することで、分母係数の離散最適化の際に安定判別が不要とした。

(4) 上記とは異なるアプローチとして、システム同定に基づき、周波数領域で所望の振幅特性を与え、時間領域で位相を指定し、時間領域でフィルタ係数の最適化を行う方法を開発した。

デジタルフィルタは、携帯電話などの通信端末、各種計測・制御装置から携帯型補聴器、人工喉頭などの福祉機器まで様々な電子機器の信号処理技術において必要不可欠なキープデバイスである。本研究では、消費電力が小さく高速駆動可能なフィルタの設計法の基礎理論を構築しているものである。特に、次節の「主な発表論文等」で示す論文[6]は世界的に権威のある雑誌であり、かつインパクトファクターが非常に高い。また、オープンアクセス権を取得しているため、世界中の誰もが論文を読むことができる。したがって、本研究はデジタルフィルタの低消費電力駆動化、高速駆動化は産業界に非常に大きな波及効果があると考えている。現状、海外の研究者達は、低消費電力・高速駆動のため、0 係数を持つ「スパースフィルタ」に関する

研究を盛んに行っている。我々のグループも本研究を足がかりに低消費電力・高速駆動フィルタの開発を目指していくことが今後の展望である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

1. 入江洋規, 中本昌由, 山本透: 大極半径指定可能な正実性制約の導出とローパス微分器設計への応用, 電気学会論文誌 C, vol. 136, no. 2, pp.123-132, Feb. 2016. DOI: 10.1541/ieejieiss.136.123
2. Masayoshi Nakamoto, Tomohiro Hirakawa and Toru Yamamoto: Design of Semi-Sparse Multi-Band Digital Filters Using Branch and Bound Method, 査読有, 巻無し, Proc. of The 41th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015), 2626-2631, Nov. 2015. CD-ROM
3. Tomohiro Hirakawa, Masayoshi Nakamoto and Toru Yamamoto: Low-delay IIR approximation of FIR digital filters based on system identification, 査読有, 巻無し, Proc. of 2015 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2015), pp.14-19, Aug. 2015. CD-ROM
4. Yusuke Sato, Masayoshi Nakamoto and Toru Yamamoto: Least-squares design of FIR digital filters with reduced-multipliers, 査読有, 巻無し, Proc. of 2015 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2015), pp.20-25, Aug. 2015. CD-ROM
5. Masayoshi Nakamoto and Toru Yamamoto: Design of Frequency-Selective Digital Differentiators without Frequency Sampling and Iterative Optimization, 査読有, 巻無し, Proc. of the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2014), pp.3425-3430, Oct. 2014. CD-ROM
6. Masayoshi Nakamoto and Shuichi Ohno: Design of Multi-Band Digital Filters and Full-Band Digital Differentiators without Frequency Sampling and Iterative Optimization, 査読有, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 9, pp.4857-4866, Sep. 2014. DOI:

10.1109/TIE.2013.2290765

7. Hiroki Irie, Masayoshi Nakamoto and Toru Yamamoto: A positive realness based approach to design of IIR low-pass differentiators with prescribed pole radius constraint, 査読有, 巻無し, Proc. of the 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP 2014), pp.96-101, May. 2014. CD-ROM.
8. Masayoshi Nakamoto, Naoyuki Shimizu and Toru Yamamoto: A System Identification Approach for Design of IIR Digital Filters, 査読有, 巻無し, Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013), pp. 2358-2363, Nov. 2013. CD-ROM
9. Hiroki Irie, Masayoshi Nakamoto and Toru Yamamoto: Design of Reursive Band-Pass Digital Filters with Robust Stability Using the Lagrange Multiplier Method, 査読有, 巻無し, Proc. of 2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2013), pp.261-266, Oct. 2013. CD-ROM

[学会発表](計 25 件)

1. 平川友大, 中本昌由, 山本透: 係数同一制約を用いた FIR フィルタの設計, 2016 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-8-12, pp. 123, 2016 年 3 月 15 日-3 月 18 日, 福岡市
2. 中本昌由, 佐藤雄介, 平川友大, 山本透: シフト演算子を含む準スパーズ係数 FIR フィルタの設計, 電気学会研究会資料(電学研資), CT-16-047, pp. 147-152, 2016 年 3 月 4 日, 東京都千代田区
3. 坂本真隆, 中本昌由, 山本透: ヒューリスティック解法による IIR フィルタの離散設計, 第 17 回 IEEE Hiroshima Student Symposium 論文集, pp.424-427, 2015 年 11 月 21 日-11 月 22 日, 岡山市
4. 佐藤雄介, 中本昌由, 山本透: 準スパーズ係数を有する低遅延 FIR フィルタの重み付最小二乗設計, 第 17 回 IEEE Hiroshima Student Symposium 論文集, pp.163-166, 2015 年 11 月 21 日-11 月 22 日, 岡山市
5. 中本昌由, 平川友大, 山本透: 分枝限定

法に基づく準スパーズ係数帯域通過フィルタの設計, 第 30 回 信号処理シンポジウム, pp.80-81, 2015 年 11 月 4 日-11 月 6 日, いわき市

6. 平川友大, 中本昌由, 山本透: 準スパーズ IIR フィルタの一設計, 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部第 66 回連合大会講演論文集, pp.229-230, 2015 年 10 月 17 日, 宇部市
7. 平川友大, 中本昌由, 清水尚之, 山本透: システム同定に基づく最大極半径指定可能な IIR フィルタの一設計法, 電気学会研究会資料(電学研資), CT-15-099, pp. 17-22, 2015 年 8 月 31 日, 東京都港区
8. 佐藤雄介, 中本昌由, 山本透: 準スパーズ・低遅延 FIR フィルタの設計, 電気学会研究会資料(電学研資), CT-15-100, pp. 23-28, 2015 年 8 月 31 日, 東京都港区
9. 平川友大, 中本昌由, 山本透: 群遅延と最大極半径が指定可能な FIR/IIR フィルタ変換法, 第 28 回回路とシステムワークショップ論文集, pp. 190-195, 2015 年 8 月 3 日-8 月 4 日, 淡路市
10. 平川友大, 中本昌由, 山本透: 分枝限定法に基づく最適準スパーズ係数 IIR フィルタの設計, 電気学会研究会資料(電学研資), CT-15-084, pp. 57-62, 2015 年 6 月 27 日-6 月 27 日, 東広島市
11. 入江洋規, 中本昌由, 山本透: IIR 帯域通過微分器の一設計とその特性解析, 電気学会研究会資料(電学研資), CT-15-011, pp. 39-44, 2015 年 1 月 28 日, 東京都港区
12. 中本昌由, 山本透: 周波数標準化を必要としない帯域選択型デジタル微分器の閉じた形の設計, 第 57 回自動制御連合講演会, pp.260-267, 2014 年 11 月 10 日-11 月 12 日, 渋川市
13. 平川友大, 中本昌由, 山本透: Lagrange 未定乗数法を用いたスパーズ IIR デジタルフィルタの一設計, 第 57 回自動制御連合講演会, pp.268-275, 2014 年 11 月 10 日-11 月 12 日, 渋川市
14. 佐藤雄介, 中本昌由, 山本透: 準スパーズ性を有する低遅延 FIR フィルタの重み付最小二乗設計, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, AS-1-8, pp. S14-S15, 2014 年 9 月 23 日-9 月 26 日, 徳島市

15. 坂本真隆, 中本昌由, 山本透: Lagrange 未定乗数法による並列構造 IIR フィルタの設計, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, AS-1-3, pp. S4-S5, 2014 年 9 月 23 日-9 月 26 日, 徳島市
16. 佐藤雄介, 中本昌由, 山本透: 準スパース性に基づく FIR フィルタの乗算数削減, 平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会, PS8-3, pp. 1881-1882, 2014 年 9 月 3 日-9 月 6 日, 松江市
17. 坂本真隆, 中本昌由, 山本透: 最大極半径制約下における並列・縦続型 IIR フィルタの設計, 平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会, PS8-4, pp. 1883-1884, 2014 年 9 月 3 日-9 月 6 日, 松江市
18. 坂本真隆, 中本昌由, 山本透: GA による IIR フィルタの離散最適設計, 平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会, GS6-5, pp. 1581-1586, 2014 年 9 月 3 日-9 月 6 日, 松江市
19. 佐藤雄介, 中本昌由, 山本透: 準スパース FIR フィルタの最小二乗設計, 第 27 回回路とシステムワークショップ論文集, pp. 50-55, 2014 年 8 月 4 日-8 月 5 日, 淡路市
20. 入江洋規, 中本昌由, 山本透: 最大極半径制約と重み関数を考慮した低域通過微分器の設計, 平成 25 年度電気・情報関連学会中国支部第 64 回連合大会講演論文集, pp.435-436, 2013 年 10 月 19 日-2013 年 10 月 19 日, 岡山市
21. 入江洋規, 中本昌由, 山本透: 制約付き 2 次計画問題に基づくローパス微分器の設計, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会, PS5-4, pp. 1885-1886, 2013 年 9 月 4 日-2013 年 9 月 7 日, 北見市
22. 入江洋規, 中本昌由, 山本透: 最大極半径制約下における帯域通過フィルタの設計, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会, GS2-8, pp. 1312-1317, 2013 年 9 月 4 日-2013 年 9 月 7 日, 北見市
23. 清水尚之, 中本昌由, 山本透: データ指向型手法による FIR-IIR フィルタ変換, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会, TC4-1, pp. 185-190, 2013 年 9 月 4 日-2013 年 9 月 7 日, 北見市
24. 入江洋規, 中本昌由, 山本透: 最大極半

径指定下における低域通過微分器の設計法, 第 26 回回路とシステムワークショップ論文集, pp. 126-131, 2013 年 7 月 29 日, 淡路市

25. 入江洋規, 中本昌由, 山本透: 不完全微分のためのローパス微分器の設計, 電気学会研究会資料(電学研資), CT-13-024, pp. 1-6, 2013 年 5 月 10 日, 熊本市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.cse.hiroshima-u.ac.jp/~nakamoto/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 福光昌由(中本昌由)
(FUKUMITSU MASAYOSHI
(NAKAMOTO MASAYOSHI))
広島大学・工学研究院・助教

研究者番号: 00403585

- (2) 研究分担者 ()

研究者番号:

- (3) 連携研究者 ()

研究者番号: