

## 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24年 4月24日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300082

研究課題名（和文） 人間の触覚メカニズムを考慮した人工指によるタッチの実現

研究課題名（英文） Representation of touch by artificial finger considering human mechanism for tactile perception

研究代表者

藤本 英雄（FUJIMOTO HIDEO）

名古屋工業大学 大学院工学研究科・プロジェクト特任教授

研究者番号：60024345

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間の触覚メカニズムを考慮した柔軟な人工指を開発し、人間のタッチを実現することを目的とした。皮下組織の繊維を有する構造に着目し、指内部構造をモデル化し、本構造が与える触知覚のための力学的効果を FEM 解析および実験により示した。また、本構造を基に人工指を開発し、人の手や指のみで発現していた特異的な触知覚現象の発現に成功した。さらに、人工指のアクチュエータのために、弾性柔軟物の飛び移り座屈を利用した瞬発力生成機構や、柔軟物と金属製骨格からなる可変剛性機構について検討した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is the development of an artificial finger including human tactile mechanism and the representation of human touch with it. The structure of subcutaneous tissue with fibers was focused and its mechanical effect for tactile perception was confirmed through the FEM analysis and the experiment. Then, an artificial finger was assembled on the basis of the structure including fibers and it was confirmed that the specific tactile phenomenon, which is generated with only the human finger or hand, is generated with the artificial finger. In addition, impulse force generators utilizing snap-through buckling of elastic objects and a variable stiffness mechanism utilizing elastic objects and metallic frames were investigated for actuators of the artificial finger.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトウェア工学

キーワード：感性ロボティクス、人工指、触覚、能動触、パチニ小体、繊維構造

## 1. 研究開始当初の背景

触るという行為の本質は能動触（アクティブタッチ）である。すなわち、触るという動作と触知覚現象における知覚表象は不可分の関係にある。したがって、本質的に双方向であり、人間のタッチを実現するためには、出力型の装置（人工指関節）に加え、入力型

の装置（人工感覚器）が不可欠である。

これまで様々な人工指が開発されてきた。近年では、把持力や滑り覚等を検出する触覚センサを内蔵し、その情報を基に制御が行われ、物体の把持や操り作業などが研究展開されつつある。しかしながら、タスクの実現に主眼が置かれており、必ずしも、人間のタッ

チを表しているものではない。すなわち、タスク実現のための触覚センサの利用、アクチュエータの駆動であり、ロボットが人間と同じメカニズムで触覚情報を取得・利用し、運動を起こしているものではない。

一方、人間のタッチは、感覚と運動が強く結びつき、強いタッチ、速いタッチ、柔らかいタッチなど、バリエーションに富む。人間のタッチの実現は、人間と直接関わる機械システムの発展に繋がる。人間との親和性が高い、自然な義手やアシスト装置の開発、人間と協調する作業ロボットへの応用が期待できる。また、人間がタッチにより取得している触覚情報を知ることができ、未だ不明な点が多い人間の触覚情報処理メカニズムの解明や、製品設計における触覚の良し悪しの官能評価に代わる評価システムとしても有効である。

## 2. 研究の目的

本研究では、人間の触覚メカニズムを考慮した柔軟な人工指を開発し、人間のタッチを実現することを目的とする。具体的動作目標は、ピアノ演奏である。豊かな音色を生み出すレベルの指使いを実現する。ピアノ演奏には、健常者でもある一定の技能が要求され、“繊細且つ巧みな触”が必要である。自由度は少ないが、皮膚感覚および深部感覚の入力、動作における俊敏性、感覚フィードバックが重要な研究課題となる。また、実現された動作の評価は、指使いと奏でられた音色、すなわち人間の感性により行われる。したがって、人間のタッチの具体的目標としては非常に適合した効果的な課題といえる。

具体的内容としては、人間の触覚機能を本質的に再現した人工指先、および俊敏な指の動きを実現可能な人工指関節の開発を行い、これらを統合し、力触覚フィードバックを有する人工指を開発、ピアノ演奏を実現する。

## 3. 研究の方法

### (1) 人間の指先領域の力学的特性解析

単に人間と同じような柔らかい弾性材料を用いただけでは、人間のタッチを実現できる指先とはならない。指先には、爪、骨、皮膚があり、これらを通じて、機械刺激は機械受容器に入力され触覚認知に使われている。なお、直接触れている領域のみならず伝播した領域も機械受容器の発火が起こっており、触覚認知に影響を与えている可能性がある。したがって、爪や骨、皮膚の構造は触覚認知に重要であり、これらによる指先領域の振動伝達特性を明らかにし、その特性に基づき人工指先を製作する必要がある。特に振動の知覚に関与しているとされており、皮膚の機械受容器の中でも最も感度が高い、パチニ小体に着目をして、皮膚構造が機械受容器に寄与

する力学的機能について解析を行う。

サルの指の標本を用いた顕微鏡下における形態学的観察を行い、それに基づき構造をモデル化、有限要素法解析および実験により、力学的特性を明らかにする。

### (2) 人工指先の製作

指先領域の力学的特性を基に、構造を簡略化したモデルを構築し、人工指を実際に作成する。

### (3) 俊敏な動作に関する検討

ピアノ演奏のような巧みな人間動作を高いレベルでロボットにより実現するためには、俊敏に動作する小型・軽量の人工指関節が不可欠である。ピアノの熟練者の場合、指を巧みに変えながら、1秒間に10回以上の同音連打を行うことも可能である。しかし、従来の技術では人間の指関節と同等のサイズと俊敏さを両立させることは極めて困難である。そこで、弾性柔軟物の飛び移り座屈を利用した瞬発力生成機構に着目し、この利用について検討する。

## 4. 研究成果

### (1) パチニ小体の分布と皮膚深部における繊維構造との力学的関連性の仮説

パチニ小体は、皮膚の深部、皮下組織にあることが知られているが、指先での分布については、人胎児の指断面標本を顕微鏡下で観察した結果(図1参照)、皮下組織を分ける繊維周辺に複数個まとまって分布している可能性が明らかとなった。これより、皮下組織における繊維構造が応力を皮膚深部へ効果的に伝搬させている可能性が推測される。

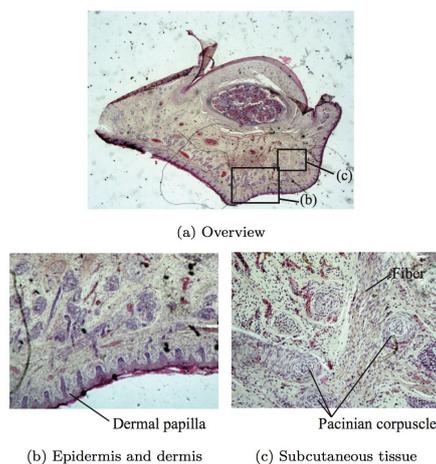


図1 胎児の指断面標本

そこで、より詳細に指断面における繊維とパチニ小体との関係を調べるため、サルの指断面標本を作成し、アザン染色およびビクトリアブルー染色を行い、顕微鏡観察を行った。

図2と図3に、上下に指の全体図および部分拡大図をそれぞれ示す。図2ではアザン染色によって、膠原線維（図2白矢印）が濃青色、基底膜が青色、細胞核が赤色に染色されている。図3ではビクトリアブルー染色により弾性線維（図3白矢印）が青色に染色されている。各断面図を見ると、膠原線維や弾性線維が指の末節骨付近から表皮に向かって放射状に走っていることが分かるこれによって皮下組織が複数の小部屋に分かれており、小部屋の内部には脂肪組織や汗腺が多数見られる。皮下組織における線維の割合としては膠原線維が多く、弾性線維は比較的太いものはまばらであった。真皮では膠原線維が大部分を占め弾性線維は観察されない。そのような皮下組織において、パチニ小体（黒矢印）は膠原線維に包まれ、集合してさらに膠原線維に包まれるようにして配置しており、図1と類似していると言える。なお、皮下組織における弾性線維の走行は特徴的で、高倍率で写真撮影した標本を重ねて観察すると、膠原線維の束の中心に弾性線維存在することがわかった

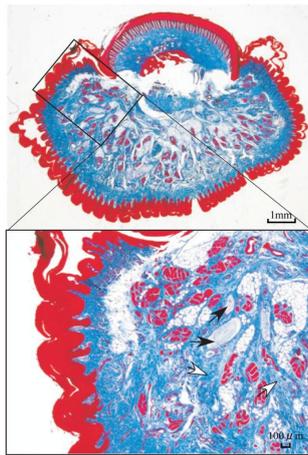


図2 アザン染色したサルの指断面標本

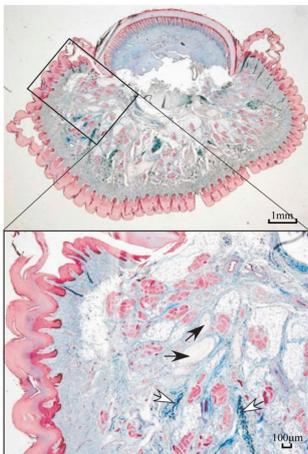
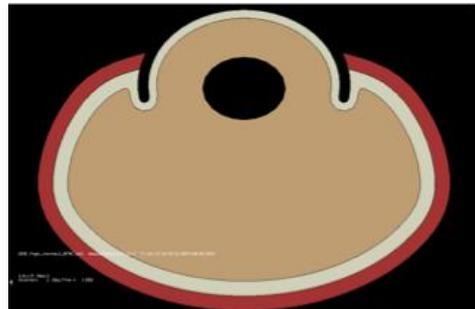


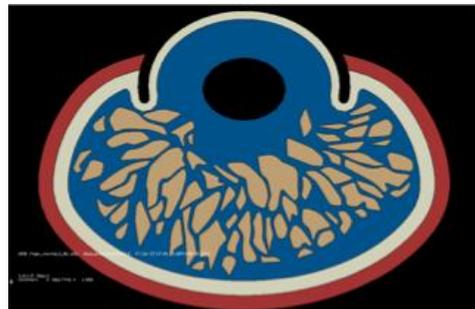
図3 ビクトリアブルー染色したサルの指断面標本

(2) 有限要素法解析による膠原線維の応力分布拡大機能の確認

指断面標本の観察に基づき、有限要素法解析用の3次元指断面モデルを作成した（図4参照）。具体的には、表皮、真皮、皮下組織、爪、骨からなるモデルで、特に、皮下組織においては、膠原線維を実際の顕微鏡で観察した指断面標本画像（アザン染色）からトレースしてモデル化した。厚みは0.5mmで、厚み方向の構造の変化は無い。なお、皮下組織において、膠原線維に囲まれた中には、実際は脂肪、血管、汗腺、パチニ小体等が存在することになるが、今回の解析では、これらに物性値としての違いは与えず、非常に柔らかい非圧縮性の弾性体が、膠原線維により小部屋に分けられているという構造とした。また、膠原線維による効果を検証するため、従来モデルともいえる、膠原線維がない均一な皮下組織を持ったモデルも準備した。



(a) 繊維なしモデル



(b) 繊維ありモデル

図4 FEM解析用の指断面標本モデル

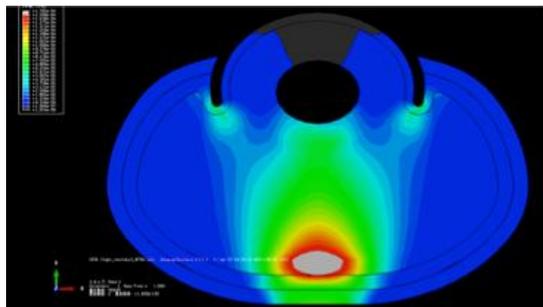
各組織の物性値については、前野ら(1997)の先行研究における、実際の人指の圧縮試験による計測結果を用いた。具体的数値を表1に示す。なお、膠原線維については、真皮の多くが膠原線維で構成されていることから、真皮と同じ物性値を用いた。膠原線維がある場合の皮下組織における脂肪やパチニ小体等に相当する部分については、指全体の剛性を基に、ヤング率を調整した。具体的には、前野らの実験においては、皮下組織は繊維等全てを含んだ形で物性値を計測している。そこで、膠原線維付きのモデルに対する解析では、膠原線維がない均一な皮下組織モデルと、

押し込み変位と押し込み荷重が同程度の値を取るよう、脂肪等に相当する部分のヤング率を調整した。爪と骨については剛体とした。摩擦なし、指腹部に対して平板による0.3[mm]の垂直方向押し込みについて解析を行った。

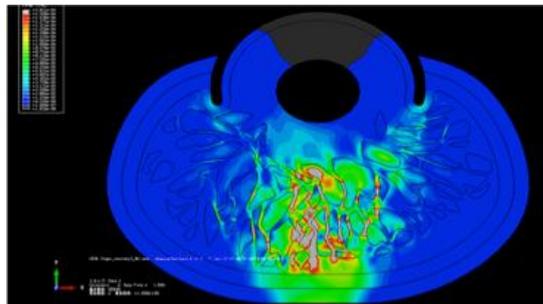
得られた結果を図5に示す。ここで、Johanson(1979)によると、機械受容器による神経発火頻度は受容器近傍の歪エネルギー密度 (SED) と同様の分布を示す。そこで、解析においては SED を求め、考察を行った。図5より、繊維なしモデルにおいても、皮下組織において、応力集中が認められるが、局所的となっていることが分かる。一方、繊維がある場合、脂肪等の繊維で囲まれた部分において、より深い位置で応力集中が起こっており、さらに、繊維なしと比べて、より広範囲に応力が広く伝搬していることが分かる。パチニ小体は皮下組織に分布し数は少ないが、こうした繊維による応力の深部への伝わりや全体への広がりから、皮膚表面の広範囲の刺激を受容することができると考えられる。本結果は、パチニ小体の分布や広受容野を支持する結果といえる。

表1 FEM解析用の各組織の物性値

Parts	Young's Modulus[MPa]*	Poisson's Ratio
Epidermis	0.136	0.48
Dermis	0.08	0.48
Subcutaneous Tissue	0.034	0.48
Fiber	0.08	0.48



(a) 繊維なしモデル



(b) 繊維ありモデル  
図5 FEM解析結果

(3) 繊維の応力分布拡大機能の単純モデル  
線維による応力集中の伝搬の様子を単純化するために線維と脂肪による構造を一般化したモデルを製作し、FEM解析および実験により検証した。モデルとしては、柔らかい弾性体が硬い弾性体に囲まれ、複数個並んでいるものである。図6にモデルの上下を圧縮した場合のFEM解析結果を示す。硬い弾性体で囲まれた柔らかい弾性体の各々で応力集中が均等に起こっており、繊維付き構造により応力が全体的に広く伝搬することが確認できた。なお、小部屋が存在しない(繊維なし)モデルについても解析したが、内側中心部で局所的に応力集中が発生するのみで、全体への広がりには少なかった。

また実験的には、2種類の硬度の異なるウレタンゲルを用いて、解析と同じ構造を製作し、光弾性実験で応力分布を調べた。その結果、応力集中が各々の柔らかい弾性体で様に起こることが確認できた。皮下組織における繊維構造の力学的効果が解析的・実験的に示せた。

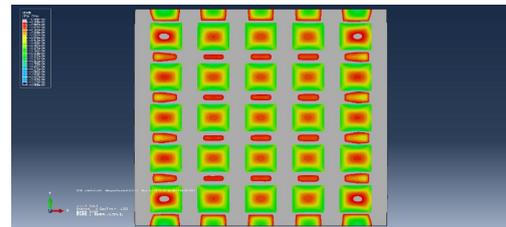


図6 単純モデルにおけるFEM解析

(4) 人工指先の開発と触錯覚を利用した有用性の検証

これまで、人指はウォーターベットモデルや均一な柔軟物で表現されていたが、上述したように、本研究で人指の内部構造の特徴と機械受容器との関連性が示された。そこで、この構造に基づき人工指先を試作した。具体的には、図7に示すようなものを開発した。みかんの小袋(じょう囊)の中身(砂じょう)を注意深く取り出し、砂じょうの代わりに包装材の気泡シート(ポリエチレン:PE)を分離し、水を封入した上で詰め込んだ。なお、気泡シートは、市販されている最小の粒径φ7[mm]、粒高2.5[mm]のものを使用した。また今回は、水小袋の配置は考慮していない。この後、隙間にウレタンゲルを充填した。

評価実験には、ベルベットハンドイリュージョン(VHI)という触覚の錯覚現象を利用した。VHIでは、硬いワイヤーを触っているにも関わらず、ベルベットのようなモワットしたソフトな感覚が生まれる。オリジナルには、自身の両手で六角形の金網を挟み込み擦るものである。ただし、受動および能動どちらでも、また自身の片手と他人の片手でも同様に発現する。しかし、一般的な均一な柔軟な人工物ではVHIがほとんど生じない。VHI

を生じる指を開発するという事は、人らしいタッチを生む人工指といえる。そこで、開発した人工指でVHIが発現するかを調べた。

VHIの発現検証実験では、人指と開発した人工指を対向させ、ワイヤーを挟んで擦り動作を行った。その結果、人両指でなぞった場合とまったく同じVHIを発現した。比較のために、従来の均一モデルと言えるウレタンゲルのみで成形したものでも行ったが、その差は歴然で、均一モデルではVHIの発現は見られなかった。なお、VHIはロバストであり、ほとんどの人が体感できるが、人工指を使った場合でも、5名の被験者全員で同様な結果を得ており、高いロバスト性があることが確認できた。

VHIの発現メカニズムについては、十分明らかになっていないが、一つの要因として、図8に示すような、ワイヤー前後での皮膚のウェーブ状の変形が重要であると見ている。左右の指を合わせると、対向する皮膚同士で対称のウェーブが作用するので、結果的に界面(接触面)は中立位置を維持したままで、圧力変化がワイヤーの周辺で生まれる。これがVHIにおける触感に関わっていると考えられる。開発した人工指では、このウェーブ状の変形が人指に近い形で起こることを確認できた。主観的ではあるが、触った感触も、開発した人工指の方が、より人指に近い感触であった。各組織の硬さの調整は必要であるが、人に近い相互作用を生じさせることができる人工指を開発できたといえる。

#### (5) 閉ループ柔軟カタパルト利用の可能性

弾性柔軟物の飛び移り座屈を利用した瞬発力生成機構について検討し、非常に簡単な機構でありながら、ピアノの鍵盤を叩くことができる程度の瞬発力を、数ヘルツ程度の周波数で繰り返し発生する能力を有する可能性を確認した。小型・軽量化を実現しつつ、人間指関節に匹敵する俊敏性を備えた人工指関節を実現できる可能性が高い。

#### (6) 可変剛性制御

人間は、筋を緊張させ自身のインピーダンスを変えることができる。これは、強いタッチ、速いタッチ、柔らかいタッチなど、バリエーションに富むタッチを実現する重要な機能である。基礎的検討として、人間の制御系を、SMAワイヤーを用いた2リンクの臆駆動ロボットを用いて比較検討し、位置制御、インピーダンス制御等に関して無駄時間を含む強い非線形性を有す系を用いた検証がなされた。また、生体に近い骨格筋構造として、柔軟物と金属製骨格からなる構造を構築し、剛性可変および制御性能を確認した。また実験的検証として、得られた研究成果を発展させて触感提示装置の構成へ利用した。



(a) 内部の様子



(b) 外観の様子

図7 人指構造にも基づく人工指



(a) 0[sec]

(b) 2[sec]

(c) 4[sec]

図8 皮膚のウェーブ変形

#### (6) 今後の課題

人指の力学的構造モデル化およびそれに基づく人工指の開発とその有用性は確認できたが、内部に機械受容器の代わりとなる触覚センサを試作、埋込むまでには至らなかった。また、人工指を動かすためのアクチュエータについても、弾性柔軟物の飛び移り座屈を利用した瞬発力生成機構を検討し、人間のような制御において重要になる可変剛性について検討も行き、それらの実装の可能性を確認したものの、人工指関節およびピアノタッチに適した人工指関節試作までには至らなかった。したがって、ピアノタッチの実現までには至っていない。

しかしながら、従来人の指や手でしか生じ得なかった、ベルベットハンドイリュージョンの人工指による発現を実現し、人間の皮膚構造に潜む、触覚受容のための重要な力学機能を解析的かつ実験的に確認することができた。これらは、従来のロボットに備わっている人工指とは大きく異なるものであり、人間のタッチの実現に大きく貢献する成果といえる。今後、アクチュエータ及び制御の部分を中心に解析、開発し、要素技術の統合による人間のピアノタッチを実現したい。

## 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6件)

- ① 望山洋, 山田篤史, 藤本英雄: 閉ループ弾性体による瞬発力発生機構, 日本ロボット学会誌, 査読有, vol. 29, no. 6, 2011, pp. 12-15
- ② 石橋良太, Panasonic Muhammad Ali Bin Rosly, 佐野明人, 藤本英雄: 柔軟介在物と SMA を利用した触覚提示法の検討, 第11回システムインテグレーション部門講演会論文集, 査読無, 2010, pp. 1481-1482
- ③ 伊藤達哉, 田中由浩, 臼田信光, 伊藤達哉, 佐野明人, 藤本英雄: パチニ小体の分布の力学的効果-有限要素法解析及びサル指標本の観察-, 第11回システムインテグレーション部門講演会論文集, 査読無, 2010, pp. 1106-1107
- ④ 伊藤達哉, 田中由浩, 佐野明人, 臼田信光, 藤本英雄: パチニ小体の分布による触覚感度への影響-心理物理実験-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会'10講演論文集, 査読無, 2010, 1P1-F14
- ⑤ 佐野明人, 田中由浩, 黒川直樹, 堀博貴, 藤本英雄: ヒト指と対向し VHI を発現する人工指と傾斜触刺激の効果-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会'10講演論文集, 査読無, 2010, 1P1-E30
- ⑥ 田中由浩, 臼田信光, 伊藤達哉, 佐野明人, 藤本英雄: 形態学的所見に基づくパチニ小体の機能的分布, 第10回システムインテグレーション部門講演会論文集, 査読無, 2009, pp. 108-109

[学会発表] (計7件)

- ① 石橋良太: 柔軟介在物と SMA を利用した触覚提示法の検討, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2010年12月24日, 仙台
- ② 伊藤達哉: パチニ小体の分布の力学的効果-有限要素法解析及びサル指標本の観察-, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2010年12月23日, 仙台
- ③ 田中由浩: 医療福祉分野における触覚技術の可能性, 福島大学共生システム理工学研究科研究プロジェクト型実践教育推進センター主催講演会, 2010年12月16日, 福島 [招待講演]
- ④ 伊藤達哉: パチニ小体の分布による触覚感度への影響-心理物理実験-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門

講演会'10, 2010年6月15日, 旭川

- ⑤ 佐野明人: ヒト指と対向し VHI を発現する人工指と傾斜触刺激の効果-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会'10, 2010年6月15日, 旭川
- ⑥ 田中由浩: ヒトの皮膚に潜む触覚機能とその応用, 日本機械学会バイオエンジニアリング部門 第33回生体機能の解明とその応用に関する研究会, 2010年3月19日, 名古屋 [招待講演]
- ⑦ 田中由浩: 形態学的所見に基づくパチニ小体の機能的分布, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2009年12月24日, 東京

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 人工手

発明者: 佐野明人, 田中由浩, 藤本英雄

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特開

番号: 特願 2010-105669

特開 2011-229849

出願年月日: 2010年4月30日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://drei.mech.nitech.ac.jp/~sano/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 英雄 (FUJIMOTO HIDEO)

名古屋工業大学 大学院工学研究科・

プロジェクト特任教授

研究者番号: 60024345

### (2) 研究分担者

佐野 明人 (SANO AKIHITO)

名古屋工業大学 大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80196295

望山 洋 (MOCHIYAMA HIROMI)

筑波大学 大学院システム情報工学研究

科・准教授

研究者番号: 40303333

田中 由浩 (TANAKA YOSHIHIRO)

名古屋工業大学 大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90432286

### (3) 連携研究者

石橋 良太 (ISHIBASHI RYOTA)

首都大学東京 大学院システムデザイン

研究科・助教

研究者番号: 20535835