

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06272

研究課題名(和文)ワイヤ懸垂構造を利用した3台のロボットによる協調組み付けシステムの開発

研究課題名(英文) Development of a cooperative assembly system with three industrial manipulators using wire suspension structure

研究代表者

大隅 久 (Osumi, Hisashi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00203779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：3台の位置制御される産業用マニピュレータを用い、大型物体の協調組付けを行うシステムを開発した。各マニピュレータ手先から物体に方向の異なる2本のワイヤを取り付け、物体を合計6本のワイヤで懸垂することで、マニピュレータ間の相対誤差による内力の発生を防止し、しかも一定値以下の外力に対して物体を剛に保持できるシステムが実現できる。このシステムにおいて、物体に目標位置・姿勢が与えられた時に、ワイヤの弛みを防止しながら、特定のワイヤへの張力の集中を回避できる逆運動学アルゴリズムを構築するとともに、穴への挿入、穴からの引き抜き作業のための力学解析を行い、制御アルゴリズムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数のワイヤにより剛体を懸垂するパラレルワイヤシステムと異なり、ワイヤの上端が空間を自由に運動できるシステムにおいて、ワイヤの弛みと特定のワイヤへの張力集中を回避するために、どのような評価関数を利用すれば良いかを明らかにした点に学術的意義がある。また、本提案システムは、ロボットコントローラを改造することなく既存の製品をそのまま協調に利用できるため、実用性が高く、幅広い応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A cooperative system for assembling large objects using three position-controlled industrial manipulators has been developed. By suspending an object with 6 wires two of which are connected to each manipulator tip, excessive internal forces due to relative error between the manipulators does not generate, and the object is rigidly positioned against external forces below a certain value. In this system, an inverse kinematics algorithm that avoids the concentration of tension on a specific wire while preventing the wire from slacking is proposed. In addition, a control algorithm for inserting and pulling out the object from a hole have been proposed based on the mechanical analysis, and its effectiveness has been verified by a prototype system.

研究分野：ロボット工学

キーワード：協調制御システム 産業用マニピュレータ 位置決め 組み立て パラレルワイヤ懸垂機構 冗長自由度

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 対象物の大きさによらず、物体を穴に挿入したり引き抜いたりする作業をロボットアームで行うには、穴側の幾何拘束に干渉しないよう物体を目標軌道に沿って動かすことが必要となる。しかし、挿入穴はロボットの外界に存在するため、位置誤差が不可避免的に存在する。よって、幾何拘束に沿って物体を動かすには、それに倣うためのコンプライアンスが必要となる。しかし、多くの産業用ロボットは、関節の摩擦、減速比の大きなギアの利用、大きなアーム慣性等、手先での高精度な力制御を困難とする特性を持つため、アーム先端での微妙な力を制御するためのコンプライアンスの実現は難しい。近年、産業用ロボットの性能向上に伴い、手首の目標力をエンドエフェクタの位置制御で管理し協調を実現する例も見られるようになってきたが、大型物体の組み付けを想定すると、ロボットは大型とならざるを得ず、相対精度を要する物体の組み付け作業では、穴との衝突による撃力の発生が避けられない。アームの各関節にコンプライアンスやトルクセンサを導入して、そこでの変位やトルクを管理することでコンプライアンスを実現している例はあるが、非常に高価な上、バネのような機構的コンプライアンスの導入手法は、本研究課題で対象とする大型物体への適用は困難である。

(2) 本研究課題の研究代表者らは 1990 年代から複数本のワイヤを利用したクレーン機構を開発し、これにより物体の組み付け作業への適用を試みてきた。ここでは、懸垂部が揺れる方向にコンプライアンスが存在するというモデルを立て、この懸垂系の持つコンプライアンス方向を挿入に適するように制御するという手法を提案してきた。またこれとは別に更に、位置制御系の利用を前提とした複数台の産業用ロボットの協調手法を提案してきた。これは、ロボットの手先に受動関節機構を導入し、その自由度や配置がある条件を満たすようにすることで、ロボット間に相対位置決め誤差が発生しても過大な内力が発生せず、また、全てのロボットの手先を固定すればハンドリング対象物も剛に保持するシステムが実現できる。これら既存の研究を応用することで、自動化の困難であった大型物体の組み付け、及び引き抜き作業の実現が期待できる。

2. 研究の目的

(1) 位置制御される 3 台のマニピュレータを協調させ、大型物体の一軸組み付け・分解システムを、パラレルワイヤ構造を利用することで簡単に実現できる手法を考案する。まず、6 本のワイヤからなるパラレルワイヤ懸垂構造の導入された 3 台のマニピュレータによる対象物の位置決め制御アルゴリズムを開発し、産業用ロボットを 3 台利用した実システムを開発し、開発されたアルゴリズムの実用可能性を検証する。

(2) 対象物の組み付け穴への挿入、引き抜きのための力学解析を行い、挿入・引き抜き制御アルゴリズムを構築する。また、アルゴリズムを実現するために必要なセンサ情報と、その利用法を示す。

3. 研究の方法

(1) 提案する協調システムは、図 1 に示すように、3 台のマニピュレータ手先とハンドリング対象物の間に、一次独立な方向の 2 本のワイヤがそれぞれ導入されており、対象物は 6 本のワイヤにより懸垂された状態となる。このような構造はパラレルワイヤクレーンとして多くの研究がされているが、本提案システムの特徴は、ワイヤ上端の位置が、それぞれ空間上を任意に移動できる点である。このため、パラレルワイヤクレーンでは懸垂物の目標位置、姿勢を定めるとワイヤ長が一意に定まるのに対して、本システムではワイヤ上端位置に運動学的な冗長性がある。そこで、この運動学的冗長自由度をワイヤ懸垂系に効果的に利用する方法を検討する。

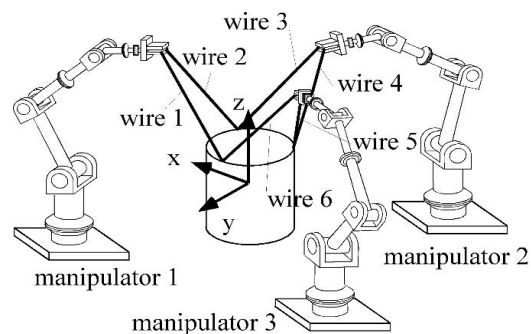


図 1 開発する協調システム

(2) 懸垂物の 1 軸組立として、円柱の丸穴への挿入、及び引き抜きを対象とし、挿入穴に対する円柱の位置誤差が存在することを前提とする。挿入時には、円柱と穴との接触により、いくつかのワイヤに弛みが発生する。そこで、接触位置、発生するワイヤの弛み、懸垂物の姿勢角から、穴と円柱の相対誤差を推定し、位置誤差を補正するアルゴリズムを構築する。引き抜きにおいては、円柱と穴の引っ掛かりにより大きな内力が発生し、引き抜きが失敗する可能性がある。この内力発生メカニズムを明らかにすることで、引き抜きを成功させるための方法を示す。

(3) (1), (2) で得られた方法を実機で実現するための協調システムの開発を行う。3 次元空間での精度の高い位置・姿勢計測が求められることから、有効に利用できるセンサ系の選択、誤差による影響について検討する。

4. 研究成果

(1) 開発システムの運動学的な解析を行い、その特徴を明らかにすると共に、運動学的な冗長自由度を効果的に利用するための逆運動学アルゴリズムの構築を行った。本システムは、6自由度の産業用マニピュレータ3台を利用しており、全部で18自由度を有する。これに対して対象物の位置・姿勢を決めるための自由度は6であり、12自由度という大きな運動学的冗長自由度を有する。一方、本システムにはワイヤが利用されており、協調搬送中にワイヤに弛みが発生しないよう、更には特定のワイヤに荷重が集中しないように注意する必要がある。また、6本のワイヤの相対的な方向が一次独立ではなくなると、ある方向に振動が発生したり、ワイヤに弛みが発生したりするため、一次独立を保つことも必要となる。これらの要件を満たすための、冗長自由度を利用した逆運動学計算手法を開発した。

冗長自由度12のうち、懸垂物の目標位置・姿勢が与えられると、マニピュレータ先端の位置は図2に示すように、それぞれ1自由度ずつのみの冗長自由度となり、このマニピュレータ先端の位置によって、ワイヤの弛み、張力集中、更には一次独立性の条件が決定される。残りの9自由度は、それぞれのマニピュレータ先端位置を固定した状態でマニピュレータが変更のできる3自由度の本体姿勢に存在する。つまり、9自由度はマニピュレータ本体の性能に関してのみ意味のある冗長自由度となり、協調系における利用法の提案としてはここでは扱わないこととした。また、ワイヤの方向が一次独立であるための条件は、先行研究で明らかにされているので、ここではワイヤの弛みの防止、

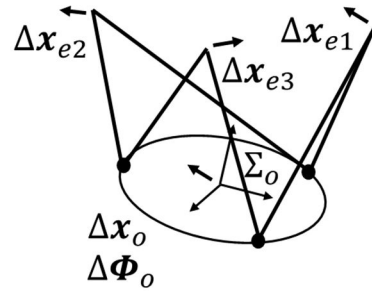
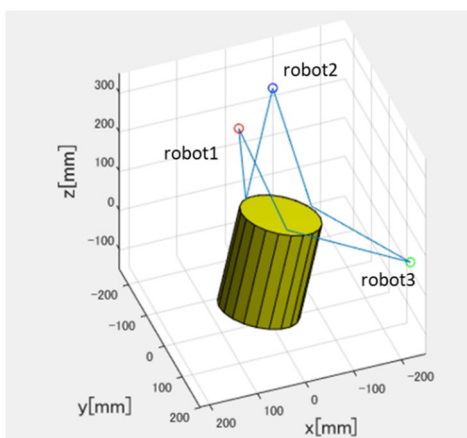
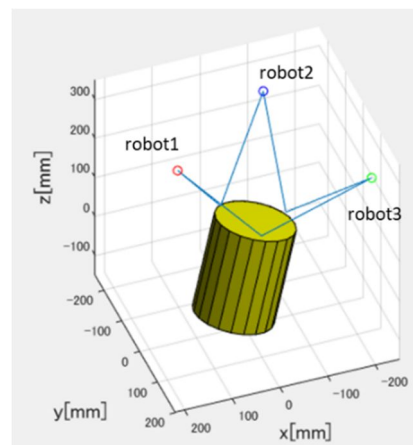


図2 マニピュレータ先端の冗長自由度

及び張力集中回避のための評価関数を検討した。まず、張力の集中回避のため、最大値を取るワイヤの張力を最小とする評価関数を利用して逆運動学解を計算したところ、収束過程において、2本のワイヤの間で最大張力が交互に入れ替わり、解が最適値に収束していかないことが明らかになった。この現象は、片方のワイヤ張力を小さくする動作がもう一方のワイヤ張力を増大させる方向となった場合に頻繁に発生する。次に、ワイヤの弛みを回避するための評価関数として、最小張力を最大化するものを試みた。その結果、3台のマニピュレータ先端は、図2において全て外側に大きく開いていき、張力が極端に増大した。以上より、評価関数としてはできるだけ条件によって不連続に変化するものではないもの、最小張力は評価指標ではなく拘束条件として扱うことが妥当であるとの結論を得た。そこで、これら両方の効果を期待し、張力の2乗和が最小となる逆運動学解を利用した。しかし、これだけではワイヤ張力の最小値が負となる場合のあることが明らかとなった。そこで、最小のワイヤ張力に下限を設けてペナルティ関数として組み込み、それを下回らないよう収束演算を行った。ただし、目標姿勢が物理的に取りうる限界値に近い場合、設定した最小のワイヤ張力がそれほど小さくなくとも、図3(a)に示すように、逆運動学解は1台のマニピュレータが外側に大きく開く姿勢となることが明らかとなった。そこで、目標姿勢に応じて最小ワイヤ張力の設定を適切に設定する手法を提案した。これは、懸垂物側の3つの取り付け点で発生すべき力のうち、z方向成分のみを調べ、それを基に最小張力を設定する手法であり、シミュレーションの結果、図3(b)のように妥当な結果を得ることができた。



(a) 最小ワイヤ張力 1 N



(b) 最小ワイヤ張力 0.35 N

図3 設定された最小ワイヤ張力の逆運動学解への影響

(2) 円柱形物体の丸穴への挿入，引き抜きのための力学モデルを検討した。6本のワイヤで対象物を懸垂した本システムでは，ある一定の大きさの外力が対象物にかかるまでは，懸垂物が動くことが無い。しかし，一定値を超えるといずれかのワイヤに弛みが発生する。この弛みが結果的に何本となり，どの姿勢で再び釣り合うかといったことを扱っている既存の研究は無い。ここでは，懸垂物の接触点から外力をもらうのではなく，接触点から強制変位が与えられたというモデルにおいて解析を行い，挿入のためのアルゴリズムを構築した。なお，利用可能なセンサとしては，マニピュレータ先端に取り付けた6軸力覚センサと，懸垂物に取り付けたIMUを前提とした。手順としてはまず，懸垂物に取り付けたIMUの姿勢データが本来の釣り合い姿勢から変化した場合に，接触が発生したとみなす。次に，6本のワイヤのうち，どれか1本のみが弛んだと仮定し，6通りの想定で，IMUの計測値となる場合の懸垂物の位置・姿勢を算出する。次に，2本のワイヤのいずれかが弛んだと仮定し，15通りの計算，3本弛んだ場合の計算を20通り行う。

次に，実測される力センサの値が，どの場合と一致するかを照合することで，懸垂物の位置・姿勢を定めることができる。なお，4本あるいは5本弛んだ場合には，弛んでいないワイヤ長とIMUの値だけでは懸垂物の位置を特定できなくなるが，力センサの値を利用することで位置を推定することができる。以上により，力センサの値とIMUの値から，懸垂物が本来の釣り合い位置からどれだけ変位したのかと，懸垂物と穴の接触点もわかる。以上より穴位置の誤差がわかるので，穴の中心位置が懸垂物の新たな釣り合い位置となるよう，懸垂物の目標位置指令を補正することで，スムーズな挿入が実現できる。

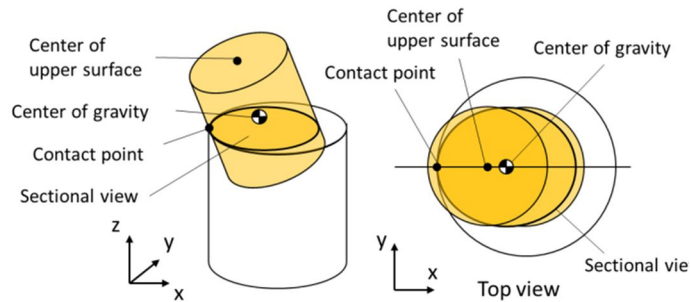


図4 力の釣り合いを満たす穴と円柱の相対位置・姿勢

次に，引き抜きにおける力学解析を行った。剛体のロボットで，部品を穴に挿入する際，姿勢誤差により部品と穴が2点で接触し，そこで発生する反力がそれぞれの接触点における摩擦円錐内に存在すると，ロボットによる挿入力に比例して内力が増大し続け，食いつきが発生する。これに対して，ワイヤによる懸垂系において，引き抜きの際に物体と穴が2点接触した場合，引き抜きにおいては引き上げ力に比例して内力が増大し続けることはなく，重力と物体の傾き角によりその値が決定されることがわかった。つまり，実現可能かは別として，もし位置誤差により2点接触状態となっても，強引に引き上げると必ず引き抜きが成功するという結果を得た。ただし，2点接触で発生する摩擦力は図5に示すように，物体の直径に比べて

長さが短い場合において，穴と物体のクリアランスが大きいほど発生しやすく，細長くクリアランスの小さな場合にはほぼ発生しないことが明らかとなった。特に，図5の右で物体の対角線と穴径の大きさが近い場合に，内力が無限大に近づく。実際には条件がもう少し緩くとも，接触力による穴や物体の局所的な変形により，モデルからは表れない無限大の内力が発生する場合や，モデルでの想定箇所以外での接触が発生することなども想定されるため，強引な引き抜きは現実的ではない。

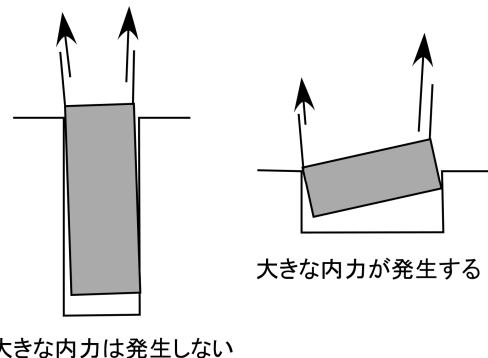


図5 引き抜き時の内力と形状の関係

懸垂物を挿入する際には，穴から強制変位が加わるといずれかのワイヤが弛み，幾何拘束を回避する方向の現象が発生する。また，その時発生する内力を，ワイヤの張り角を変えることで管理することができる。これに対して引き抜きにおける内力の発生は，重力成分ではなくワイヤを引っ張り上げるための巻上げ力により増大する。これを回避する際には，懸垂系の持つコンプライアンスの利用はできず，懸垂物の姿勢を穴の姿勢に合わせる必要がある。すなわち，コンプライアンス制御の概念ではなく，接触を検出しながら絶えず懸垂物の姿勢を微修正していくことが引き抜きのための必要な制御法であるとの結論を得た。

(3) (1), (2)で得られた手法を実機実験で検証するためのシステムを開発した。図6にシステムの写真を示す。マニピュレータの制御には，安川電機社製の6軸産業用ロボット MOTOMAN-HP3Jを2台，MOTOMAN-MH3FUPJを1台利用した。いずれも可搬重量は3kg，繰り返し位置決め精度は $\pm 0.03\text{mm}$ である。コントローラには同じ安川電機社製 RT-Labを利用した。それぞれのロボットには Art-Linux を搭載した制御 PC が接続されている。協調制御指令は別のメイン PC の windows 上で生成され，3台の制御用 PC にイーサネットを介して UDP 通信で

送られる。メイン PC から送られる各マニピュレータの速度指令は、制御用 PC で 6 つの関節角の 1ms 毎の増分に変換され、目標関節角度が計算される。一方で、RT-Lab から 6 軸のエンコーダのカウント情報を受け取り、PID の位置指令として 1ms のサンプリングタイムで RT-Lab に出力する。また、メイン PC には、対象物、及び各マニピュレータ手先の位置を計測するカメラシステム（ディテクト社製 DIPP-Motion V/3D、計測精度 0.453mm、標準偏差 0.136mm）が接続されており、予め、各マニピュレータの据え付け誤差、及びワイヤ長等のパラメータ誤差のキャリブレーションを行っている。円柱の大きさは、直径 165mm、長さ 200mm、重量 2.55kg で、穴径は 190mm である。また、ワイヤ長はいずれも、約 250mm となっている。

まず、初期位置にある舞台を、実現可能な限界に近い傾きになるまで、提案アルゴリズムで変位させた時の実験結果を示す。与えた目標位置は原点 [0, 0, 0] で、姿勢はロールピッチヨー角 [0.84rad, -0.29rad, -0.11rad] である。シミュレーションで得られた動作をさせた時の懸垂物の位置・姿勢の実験結果は [-0.91mm, -2.73mm, -0.55mm, 0.86rad, -0.28rad, -0.09rad] と、若干の誤差が見られるもののほぼ予定通りの動作が実現できた。また、その時の 6 本のワイヤ張力と、シミュレーションで得られた理論値、また、張力を考慮せずマニピュレータの動作を最小ノルム解で生成した場合を表 1 に示す。ここではワイヤの最小張力を 0.35N と設定している。この結果を見ると、実験においてもワイヤの最小張力を保ちながら、張力の 2 乗和を小さくできていることが確認できる。

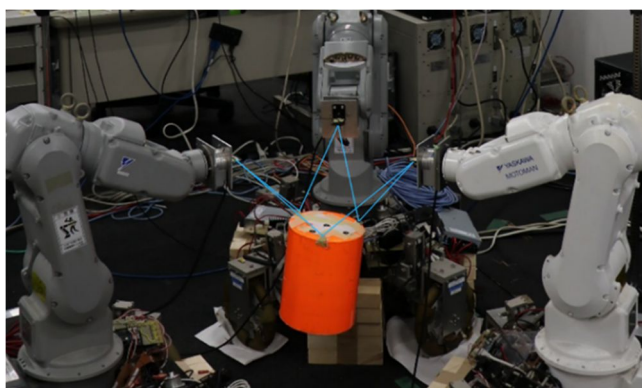


図 6 開発した協調システム

次に挿入実験を行った結果を表 2 に示す。補正は x, y 面内で行うので、 z 座標は省略してある。予め穴位置を水平な懸垂物の中心軸から 25mm だけずらしておき、一方、計測結果から得られるずれ量を補正するための動作を加えている。結果を見ると、補正後の x 成分に若干の誤差が見られるが、懸垂物姿勢に関して補正前の x, y 軸回りに発生している傾き角 ϕ, θ はほぼ水平に補正されていることが確認できる。水平方向誤差に関しては、システム全体のサイズが大きいため、マニピュレータ設置位置や姿勢角、カメラシステムの据え付け位置等の誤差のキャリブレーションを完全には行うことができていない点が原因と考えられる。なお、引き抜きに関しては、準備することのできた懸垂物、穴の種類が少なく、予想通り、いずれも単なる位置指令により容易に実現することができた。

以上、ワイヤを利用した協調システムにおいてワイヤの弛みと張力集中を回避することのできる逆運動学アルゴリズムの有効性、穴と接触した円柱形状物体の釣り合い位置からの誤差の計測と丸穴への挿入アルゴリズムの妥当性が検証された。また、引き抜きに関しても、予想通りの結果を得ることができ、力学的解析の妥当性が検証された。

表 1 ワイヤ張力の比較

	実験	シミュレーション	最小ノルム解
wire1[N]	12.2	12.0	11.4
wire2[N]	5.9	7.0	9.4
wire3[N]	6.2	6.8	8.7
wire4[N]	1.9	0.5	-0.3
wire5[N]	0.8	0.5	1.4
wire6[N]	8.2	8.9	12.0
$\sum \tau_i^2$	291.6	318.0	441.2

表 2 挿入における穴位置補正実験

	初期位置	補正後
x[mm]	5.66	-4.47
y[mm]	-25.6	0.99
ϕ deg	-0.76	-0.39
θ deg	1.77	-0.28
φ deg	5.49	0.29

<引用文献>

大隅 久, 加賀谷学, 相山康道, 3 台の産業用ロボットによる協調制御システムの開発, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.74, No.748, 2008, 2985-2993.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 森下翔午, 大隅久
2. 発表標題 ワイヤを用いた3台の産業用マニピュレータにおける協調組み付け
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関村悠太
2. 発表標題 ワイヤを利用した3台の移動マニピュレータによる協調搬送制御
3. 学会等名 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SI2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M.Ogisaka, S.Morishita, Y.Sekimura and H.Osumi
2. 発表標題 Cooperative positioning system of three manipulators with wire suspension mechanism
3. 学会等名 International Workshop on Fukushima Decommissioning Research (FDR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S.Morishita, M. Ogisaka, Y. Oshikawa, Y. Sekimura and H. Osumi
2. 発表標題 Cooperative Transportation System with Three Omni-Directional Mobile Manipulators with Wire Mechanism
3. 学会等名 IFAC WROCO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 押川慶則, 荻坂まりな, 大隅久
2. 発表標題 ワイヤを利用した3台のマニピュレータによる物体の協調位置決め
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	相山 康道 (Aiyama Yasumichi) (60272374)	筑波大学・システム情報系・教授 (12102)	