

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月23日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00364

研究課題名(和文) 移動ロボットの注視機能に基づく他者動作認識の研究

研究課題名(英文) Study on Action Recognition and Autonomous Work by a Mobile Robot based on Attention Mechanism

研究代表者

藤田 豊己 (Fujita, Toyomi)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：90293141

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)：複数ロボットの協調作業における効率的な情報獲得のために注視機能が有効であると考え、ロボットの動作映像を被験者が観察したときの視線を計測し、その特性を検証した。その結果、対象物やロボット間の注視を繰り返すことや、予測に伴う「先読み」による注視の移動があることがわかった。また、協調相手のロボットの動作認識のため、画像処理技術を用いて観察映像から注視点を獲得し、それに基づいて他者ロボットの位置情報を獲得することができた。さらに、複数腕を有する移動ロボットによる自律運搬に向けて、対象物上の注視点から箱状対象物を両腕により把持持ち上げる手法を考案し、実機実験により有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究でロボット動作観察時の注視特性の知見が得られた。今後の研究の発展でロボットによる効率的な情報取得が可能になってくることが期待できる。さらに、画像処理に基づく注視を生成し、それにより他者ロボットの3次元位置の検出を行うことができた。また箱状対象物の自律把持持ち上げを実現することができた。今回考案した手法を応用していけば、協調相手のロボットの動作理解や、危険な現場での自律的な作業の実現が期待でき、将来の幅広いロボットの活躍が可能となってくる。

研究成果の概要(英文)：An attention mechanism is useful for obtaining essential information effectively in a cooperative work by multiple robots. Thus, an experiment was conducted to investigate characteristics of human attention when observing movies of robot action. The result suggested that we attend between objects and robot repeatedly to recognize the action, then attend the target object to anticipate the action. Next, a method for generating robotic attention was considered by applying image processing techniques to detect 3-D position of a partner robot as a part of action recognition. Experimental result confirmed that the proposed method can detect valid position. Also, two methods were presented for detecting attentive positions on a box-shaped object to grip and lift up in a transportation task based on corner detection and plane detection. These methods were applied to a tracked mobile robot with multiple manipulation arms. The experimental results showed that these are valid for autonomous work.

研究分野：ロボット工学

キーワード：注視特性 ロボット注視機能 自律運搬作業

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットには複数台で互いに協調しながら様々な作業を遂行していくことが期待されている。そのためには、ロボットは相手を観察して暗黙的に相手の動作を理解する必要がある。この動作認識のためには、カメラから観察される映像を実時間で効率的に処理することが必要であり、そのためにはロボットによる注視機能が重要であると考えられる。先行研究では、この特性に基づきボトムアップとトップダウンの画像処理手法を適用した注視機能を開発したが、まだ単一画像を対象としており、時系列の画像への考慮が不十分であった。さらに動作認識については、個々の画像における関心領域の変化から単純にロボットの運動ベクトルを検出するのみにとどまっていた。しかしながら、様々な動作を認識するには、ロボットが観察映像から注視領域を的確に獲得することが必要となる。また、そのような注視領域が獲得できれば、対象物の操作等のロボット自身による自律的な作業も効率的に実現することが可能となってくる。

### 2. 研究の目的

(1) ロボットの効率的な情報獲得のために、人間が有するような視覚的注視機能の実現を目指す。具体的には、時系列の関心領域(Region-Of-Interest: ROI)を周期的な単位で切り出し、その連続の関心領域を文字とみなした「ROIワード」を獲得する。そして、そのROIワードの連続を文字列とみなして「ROIセンテンス」を獲得することで各動作要素を獲得することを目指す。そのため、ロボット動作観察時の注視計測実験をおこない、特性を検証する。

(2) 協調相手のロボットの動作認識のため、画像処理技術を用いて観察映像から注視点を獲得し、それに基づいて他者ロボットの位置等の情報を求める。

(3) 自律的な作業可能性を示すため、対象物の位置や面情報を求め、対象物の操作を可能とする。

### 3. 研究の方法

(1) ロボットによる効率的な情報獲得のために、人間が有する視覚的注視機能の特性を検証した。まず、人間の注視位置を計測するための視線計測実験システムを構築した。このシステムの概観を図1に示す。本研究では、The Eye Tribe社が開発した視線計測装置「The Eye Tribe」を使用した。これは角膜反射光法の原理で注視点を得るものである。この寸法は幅20cm、高さ1.9cm、奥行き1.9cmで、重量は約70gである。これとメインPCをUSB 3.0で接続し、The Eye Tribeをディスプレイの手前に設置した。このシステムでメインPCにてディスプレイへロボットの動作映像を呈示し、それを被験者が観察したときの視線を計測した。このデータ収集もメインPCにて行い、その結果から注視点を抽出した。観察映像にはロボットが対象物操作するために作業腕を動作させているときのものや、ロボットが複数の対象物に向けて移動し、いずれかを選択するという動作のものを用いた。そして、それらを観察したときに計測された注視点データを解析して特性を検証するとともに、周期的なデータからROIワードとROIセンテンスの獲得を試みた。

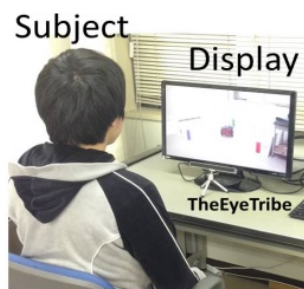


図1 注視点計測実験

(2) 画像処理技術により得られた注視領域より協調相手のロボットの位置認識をおこなった。ここでは、SURFと呼ばれる画像処理技術を用いて他者ロボットを観察した画像上の注視点を検出した。そして異なる視点からの画像間で得られた注視点の対応点とその特徴量から探索し、その対応点の位置関係からステレオビジョンの原理により3次元位置を獲得した。この手法を図2に示す実験システムに適用し、観察ロボットによる協調相手のロボットの3次元位置検出を行った。

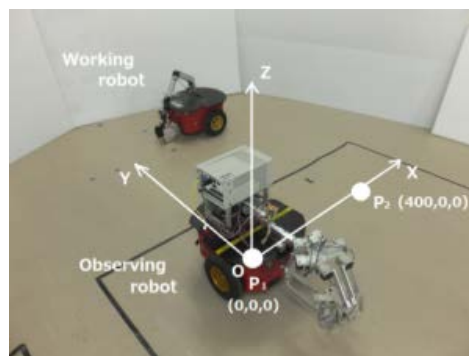


図2 他者ロボット位置検出実験

(3) また作業対象物についての注視領域を検出し、自律的に運搬するための方法を考案した。ここでは、双腕を有するロボットによる箱状対象物の運搬を想定し、FAST (Features from accelerated segment test) と呼ばれる手法により画像上の注視領域を検出し、対象物の把持面と把持位置を獲得して作業を行う方法を考

案した。オペレータによる遠隔操作等によりロボットは対象物正面に位置しているものとする。ロボットは搭載している RGB-D センサより画像情報を取得し、それにテンプレートマッチングと FAST を適用する。その結果、対象物の頂点の位置が注視点として得られる。この情報より対象物側面の把持面と把持時の手先位置およびロボットの位置を求め、その位置にロボットは移動して対象物を把持して持ち上げる。この手法を図 3 に示す双腕を有するクローラ型不整地移動ロボットに適用し、実機実験によりその手法の有効性を検証した。

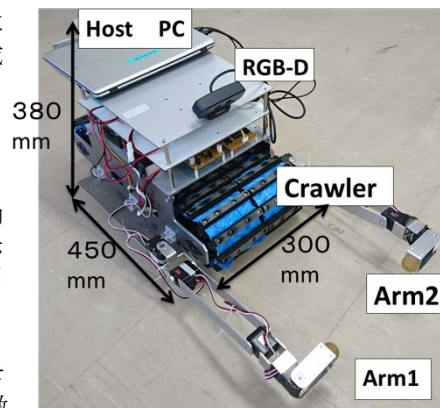


図 3 双腕クローラ型ロボット

さらに別の方法として、最初に把持面を検出し、そこから注視すべき把持位置を算出して作業を行う手法を考案した。まずセンサから得られた深度データを用い、微小領域面の位置と方向の情報からそれらを統合し、対象物の面情報を取得する。これを複数位置からの観察により行い、それらを統合して対象物の各面を獲得する。そして、把持面を決定するために、対向する方向の法線を持つ 2 面の組を抽出する。その 2 面の中心を注視点とし、その位置と法線ベクトルから逆運動学を計算し、ロボットの位置・姿勢と左右腕の各関節角度を算出する。その解が存在すれば、その面の組は把持可能となるので、把持候補面として保持する。これを全ての 2 面の組で行い、得られた把持候補面の中からロボットの移動距離が最小となる面の組を把持面とし、ロボットの把持位置を決定する。この方法を複数の腕を有するクローラ型ロボットに適用し、実機実験により提案手法の有効性を検証した。

#### 4. 研究成果

(1) ロボット動作映像観察時の注視特性を検証した。ロボットが赤色対象物に移動している映像を観察したときの結果を図 4 に示す。ロボットは図中黒点線で示した軌跡で移動して赤色対象物に到達した。各色の点は、計測された各時間帯での注視位置を示す。図 5 の赤色、緑色、黒色のグラフは、注視点と赤色対象物、緑色対象物、およびロボットとのそれぞれの距離の結果である。この結果から、移動しているロボットの軌跡付近に注視点が集まる傾向が見られた。だが映像観察開始時は注視点にばらつきがあり、ロボットのみではなく様々な所を注視していることが読み取れる。そして時間の経過とともに、ロボットとの距離が小さくなる傾向があり、さらにそのばらつきも小さくなった。この結果より、最初は様々なところを注視して全体像を把握し、その後動作している対象で映像の主体でもあるロボットに視線を向けるようになるという特性があると言える。また、時折対象物を注視しており、目的とする対象物を予測しようとする意図が作用したと考えられる。一方、20 秒過ぎに見られるように大きく注視点が外れるときもある。これは動作の内容が把握できたことで対象への興味が薄れたために生じた現象であると考えられる。終盤ではさらにロボットを注視する傾向が強くなっているが、ロボットが目的の対象物に近づいたことで対象物に注目したとしても結果的にロボットに近い注視位置になったためでもある。

他の映像での結果も同様の傾向が得られ、対象物やロボットの間での注視を繰り返すことや、予測に伴う「先読み」による注視の移動があることがわかった。観察開始時は全体の状況把握のために注視領域が分散するが、主に移動するロボットやハンドを追跡すること、その中で動作の予測と考えられる対象物への注視が行われること、時折関心が薄れたときに大きく注視領域が乱れること、などの特性を確認することができた。

このような注視特性は得られたものの、ROI ワードや ROI センテンスを得るには至らなかつ

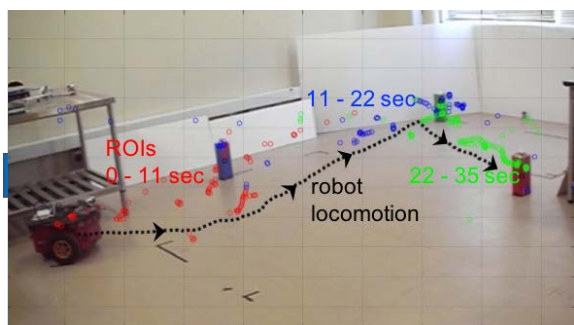


図 4 選択移動映像観察時の注視位置

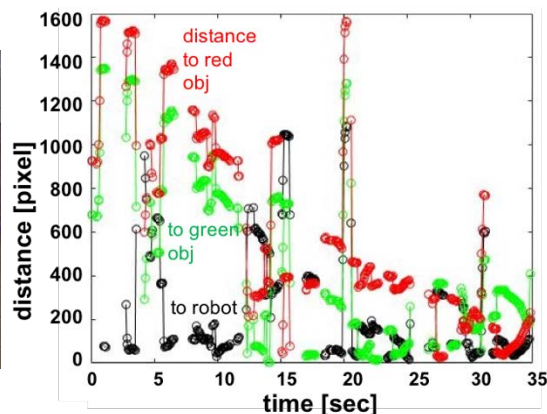


図 5 注視点と対象物およびロボット間距離

た. その理由として, 今回の実験データからは十分な規則性を得ることができなかったこと, そして追加実験をする際に視線計測装置のデータ処理ソフトウェアに不具合が生じたが, 装置のサポートがすでに停止しており, さらなる実験を実施することができなくなったことが挙げられる. そのため, 研究の主眼を移し, 画像処理による注視領域の獲得とそれによる他者ロボット位置検出と自律作業実現に向けた研究に主に取り組みこととした.

(2) コンピュータビジョンで近年注目されている SURF (Speeded-Up Robust Features) と呼ばれるアルゴリズムを使用し, 注視すべき特徴点を検出して協調相手のロボットの 3 次元位置を獲得した. 図 2 に示した実験環境において, 観察ロボット (Observing robot) が静止状態のカメラを持たない作業ロボット (Working robot) を 2 点 ( $P_1, P_2$ ) から観察し, 各画像から得られた SURF 特徴量より画像間の注視点の対応を求めた. その結果を図 6 に示す. 各対応点を線で結んでいる. そしてこれらの対応点から作業ロボットの 3 次元位置を算出した. その結果を表 1 に示す. 1 行目の Working robot の値が実際の位置であり, 2 行目が SURF により得られた座標値である. 比較のため, 類似の特徴量である SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) を用いたときの結果を 3 行目に記した. 全ての方向の座標値で SURF の方が高精度となった. また, この処理についても SURF の方が約 1.8 倍高速に実行することができた.



図 6 検出した対応点

表 1 ロボット 3 次元位置検出結果

|               | X[mm] | Y[mm] | Z[mm] |
|---------------|-------|-------|-------|
| Working robot | 410   | 1430  | 50    |
| SURF          | 383   | 1405  | 67    |
| SIFT          | 373   | 1462  | 75    |

(3) 多面体形状対象物の注視点を検出し, 自律的な把持持ち上げ作業動作を実現した. RGB-D センサから得られた画像においてテンプレートマッチングを行って対象物領域を検出し, その領域の深度データに対して FAST を適用して注視すべき物体上の特徴点を検出した. FAST は決定木を用いてコーナーを検出する手法であり, 高速な処理が可能となる. 深度画像からの箱状対象物の注視点検出結果を図 7 に示す. 四角枠は対象物の領域であり, その内部の領域のみから検出された. 丸で囲んだ各点が注視点となる. これらの点から対象物頂点を抽出した結果を図 8 に示す.  $P_1, P_2$  は上面の左後および右後の頂点,  $P_3, P_4$  は左前および右前の頂点となっている.  $P_{lh}$  および  $P_{rh}$  は床との境界点となる底面前部の頂点である. これらは深度値が急激に変化する点より求めた.

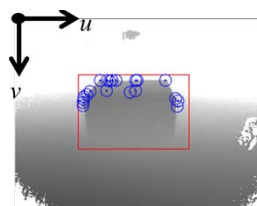


図 7 検出した注視点

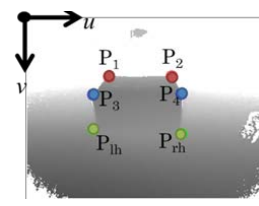


図 8 対象物頂点検出

この方法により, サイズ  $205 \times 270 \times 100$  mm, 質量 175g の箱状対象物の把持持ち上げ実験を行った. ロボットの初期位置は対象物からおよそ 4~5m ほど離れた地点に設定した. このときのロボット動作結果を図 9 に示す. 検出した対象物頂点から手先把持位置を算出し, 図中 (a) でその位置へ両腕手先を移動し, (b) で対象物を把持し, (c) で対象物を持ち上げた. この結果より, 本手法での対象物の自律的な把持が可能であることが確認できた. だが, 後側の頂点について深度値の誤差が大きくなり, それが原因で正確な手先把持位置検出が難しくなるという問題点が生じた.

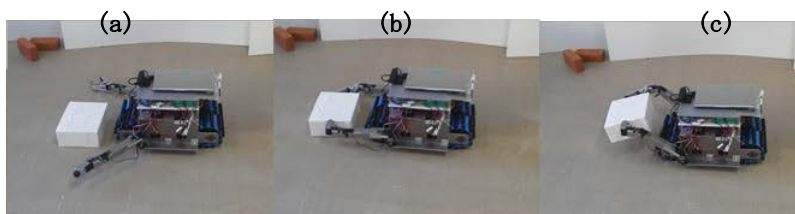


図 9 対象物頂点検出による対象物把持持ち上げ実験

この問題点を解決するため, 最初に把持面を検出し, そこから注視すべき把持位置を算出して作業を行う手法を考案した. 最初に, ロボットに搭載した深度センサにより取得された深度画像の各探索点の隣接する 3 点より微小面群を生成し, 隣接する各微小面の単位法線ベクトルの内積の絶対値が 1 に近いものは同一面として統合した. 図 10 にその概念を示す. 上部は探索点から生成された微小面とその法線ベクトルを示しており, 下部では各法線ベクトルより統合された平面を示している. これを図 11 に示すように対象物正面, 右側, 左側の 3 点 O, P, Q からの

観察により行い、それらを統合して対象物の各面を獲得した。その結果を図 12 に示す。各色はそれぞれ青色が対象物正面、緑色が右側面、黄色が左側面、赤色がそれらの真の平面を表す。このように対象物の正面、右側面、左側面の平面を検出することができた。

次に、得られた平面から対向する方向の法線を持つ 2 面の組を抽出し、その 2 面の中心を注視点とし、その位置と法線ベクトルから逆運動学を計算した。この解が存在したとき、その面は把持可能面となり、そのときのロボットの把持可能位置も得られる。この算出結果を図 13 に示す。対象物の側面部分が把持候補面として検出され、このときのロボットの把持位置として、図中  $R_1 \sim R_4$  の 4 点が得られた。この中から、この時のロボット位置からの移動距離が最短となる  $R_4$  点が把持位置として選ばれた。この位置にて把持持ち上げを行うときのロボットの位置・姿勢および作業腕の姿勢を図 14 に示す。このとき把持する面の中心を注視点とし、逆運動学で得られた関節角度に従って左右腕を制御して両腕の手先をその位置にして把持持ち上げを行うことができる。

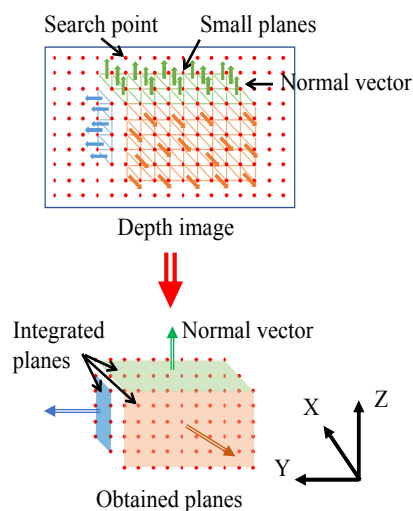


図 10 対象物平面検出例

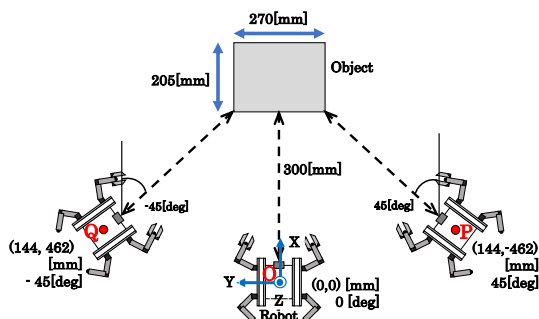


図 11 対象物観察位置

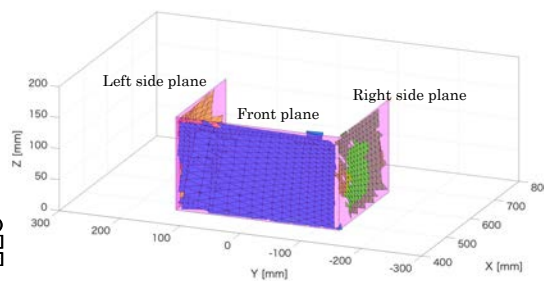


図 12 対象物平面検出結果

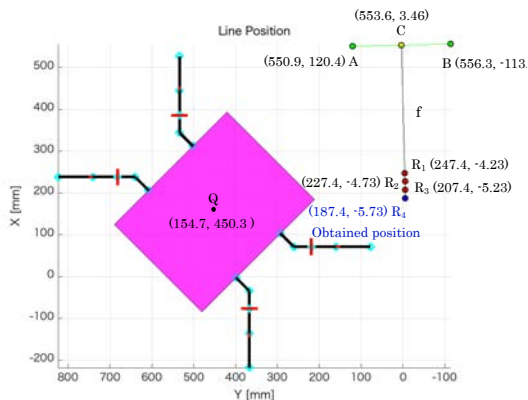


図 13 対象物平面検出結果

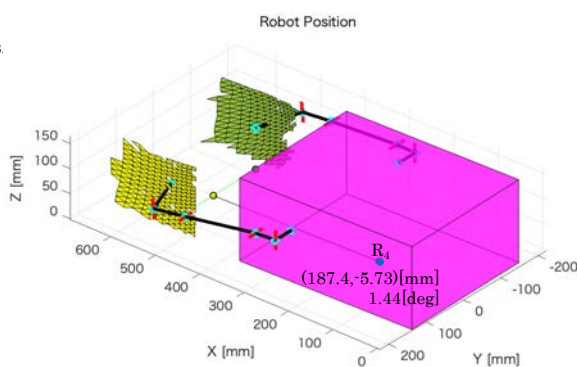


図 14 対象物平面検出結果

ここで、左右の観察位置を自律的に決定する手法も考案し、最初に対象物正面から観察したときに得られた対象物のサイズから、可能な限り対象物の側面をセンサで捉えられるように位置と姿勢を決定するようにした。そして、それも含めて一連の対象物の自律把持持ち上げ実験を行った。そのときの動作結果を図 15 に示す。(a)で図 11 に示した初期位置 0 にて対象物正面の観察を行い、得られた対象物寸法から右側観察位置 P、左側観察位置 Q を算出した。(b)で位置 P へ移動し右側面を観察し、(c)で位置 Q へ移動し左側面を観察した。そして、これら 3 観察点から

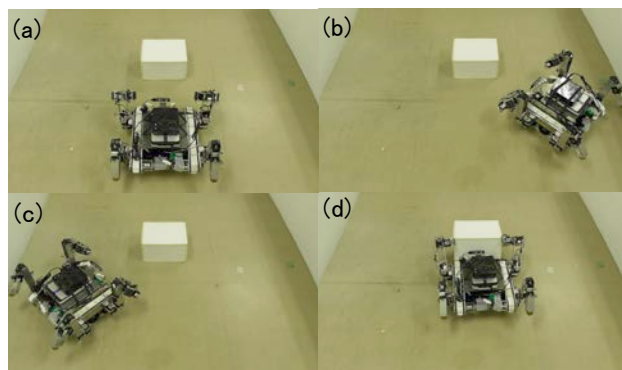


図 15 自律把持持ち上げ実験結

得られた平面情報を統合して把持面及びロボットの把持位置・姿勢を獲得し、(d)で算出した把持位置へ移動して対象物の把持・持ち上げを行った。この結果より、提案手法により多面体形状対象物の自律的な把持持ち上げが可能となることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 14 件)

① Toyomi Fujita and Nobuatsu Aimi, "Autonomous Gripping and Carrying of Polyhedral Shaped Object based on Plane Detection by a Quadruped Tracked Mobile Robot," In Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2019), 2019 (accepted)

② Toyomi Fujita and Wataru Segawa, "Object Gripping and Lifting based on Plane Detection by Tracked Mobile Robot with Two Manipulators," In Proceedings of the 2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), pp.412-416, 2017.

③ Toyomi Fujita and Kento Yamada, "3-D Position Detection of Partner Robot using SURF Descriptor and Voting Method for Indirect Cooperation Between Multiple Robots," In Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2016) - Volume 2, pages 522-525 ISBN: 978-989-758-198-4, 2016

④ Toyomi Fujita, "Regions of Interest in Object Selection and Hand Movement Actions by Wheeled Mobile Robot with a Manipulator," The 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2016), pp.20-23, 2016

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eis.tohtech.ac.jp/study/labs/fujita.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※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。