

折りたたみ機能を有するロボットハンドの開発

池田英俊（富山高専） 佐伯拓未（富山高専） 水上裕太（富山高専）
坂本真滉（富山高専） 佐藤圭祐（富山高専）

1. はじめに

多指ハンドは、多くの人間共存型ロボットに搭載されており、その高機能化には指と駆動関節数の増設が必要である。これまで多くの多指ハンドの研究が行われてきており、例えば、Mouri らにより、人間の手のような、20 関節 16 自由度を有する 5 指ロボットハンドが実現された [1]。人間の手をモデルとした多自由度を有するロボットハンドは、道具の使用や蛇口やドアノブ操作など、人間の生活空間に適応させやすいという利点を有している [2]。一方、フィンガの数と駆動する関節数の増加は構造の複雑化や高コスト化を招き、そして、その割には作業遂行能力の向上が見込めないことから、実用化には程遠いシステムとなりがちである。そのため、比較的 low 自由度の多指ハンドやグリップにて複雑なハンドリング作業を実現しようとする試みもなされている [3][4]。

本研究グループでは様々な作業を行う際の人間の手の形 (Fig. 1 (a)) を、折りたたみ可能な機構を用いて模倣することで (Fig. 1 (b))、従来型ハンドに比肩する能力をもつ低自由度型ロボットハンドの実現を目指している [5]。提案するロボットハンドは手と把持対象物との接触面積を広くとることで、面で力を作用させるハンドリング（乗せる、つかむ等の動作）と、一部の指のみを使用し、物体に対して点で力を作用させるハンドリング（つまむ、ひっかける等の動作）を機構を変形させることにより、人間の手の形を模倣して、物体をコントロールするものである。

人間の手は比較的大きな物体をハンド機構に乗せる、もしくは、単につかむ場合においては、一旦ハンドリングを開始すると、指の各関節を独立して制御し続ける必要は少ない。また、小物体をつまむ際には、把持対象物に対して直接、力を作用させていない指（いわゆる「遊んでいる指」）も存在する。

提案するハンドは接触面積の広い面状のフィンガを有する機構を用いることで、物体に対するつかみ作業を実現し、また、フィンガ形状を人間の指でつまむ形に変化させることで、駆動可能な関節を効果的に活用し、少ない関節駆動数でつまみ動作を実現する機構を用いる [5]。

本稿では、本ロボットハンドのシステムと本棚に立ててあるリングファイルのかき出し戦略ならびに実験に関する報告を行う。以下、第 2 章では本ハンド機構のハードウェアとシステム構成に関して述べ、第 3 章ではファイル取り出し戦略と実験について示す。そして、第 4 章にて結論を述べる。

2. ロボットのハードウェア

ロボットハンド (JINZU, Fig. 2), ハンドを取り付ける肩関節から手首までのマニピュレータ、そして、それ

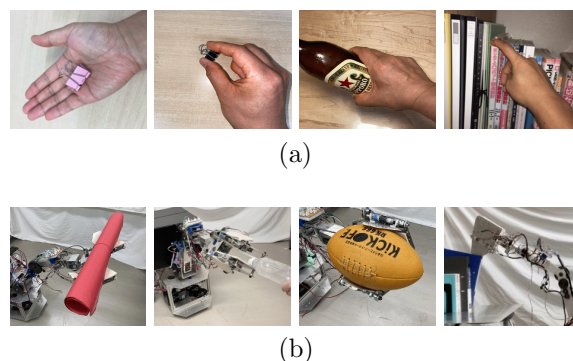


図 1 Various tasks performed by a human hand and the robot hand with foldable planar mechanism, (a) Human hand, (b) The robot hand

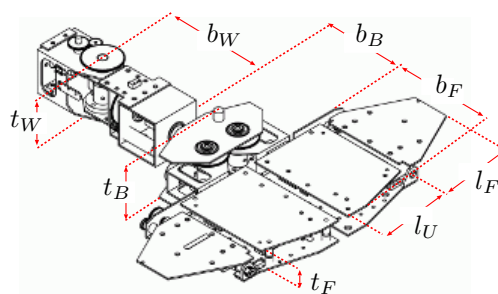


図 2 Schematic diagram of robot hand (JINZU)

らを搭載する移動機構の開発を行った (Fig. 3)。Table 1 に本ハンドの諸元を示す。

移動機構は左右独立対向 2 輪駆動方式を採用している。この左右駆動輪にはモータ (ツカサ電工 TG-85E-SU-47.9-KA, 24V) とエンコーダ (AUTONICS E30S4-100-3-N-5) を搭載している。この移動機構上部にはマニピュレータを搭載している。本マニピュレータは肩関節 (J_1, J_2), 肘関節 (J_3 , モータ: ツカサ電工 TG-85E-KU-113-KA, 24V, エンコーダ: RE-160F-40E3-20A-24P), ハンドの方向を変化させる手首関節 (J_4 , モータ: TG-101C-GU-581-KA, 24V, エンコーダ: REC W20D-25-201-1) を有している。

ハンド機構は J_4 の先端に取り付けられる (Fig. 3)。本機構は平面状の機構部分 (以下、フィンガ) と、そのフィンガのベースとなり、2 つのフィンガを開閉するための機構部 (以下、フィンガベース) と、そして、フィンガとフィンガベースからなるハンド全体をロール方向に回転させる機構 (以下、リスト) からなる (Fig. 4)。

Fig. 5 にハンド機構のハードウェアを示す。左右の

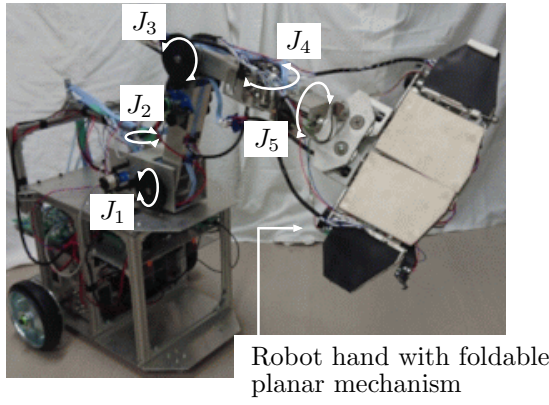


図 3 Photograph of wheeled robot with the robot hand

表 1 Specifications of robot with proposed robot hand

Overall length of wheeled mechanism	450 [mm]
Overall height of wheeled mechanism	270 [mm]
Radius of front wheels	15 [mm]
Radius of rear wheels	90 [mm]
Wheelbase	340 [mm]
Upper arm link of manipulator (joints 1 to 3)	300 [mm]
Forearm link of manipulator (joints 3 to 4)	220 [mm]
Width of wrist (b_W)	112 [mm]
Thickness of wrist (t_W)	78 [mm]
Width of robot base (b_B)	84 [mm]
Thickness of robot base (t_B)	86 [mm]
Length of U-link (l_U)	132 [mm]
Length of F-link (l_F)	104 [mm]
Thickness of Fingers (t_F)	30 [mm]
Width of fingers (b_F)	154 [mm]

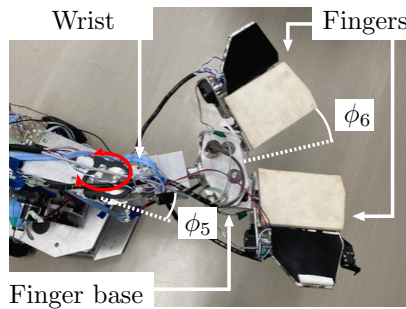


図 4 Wrist and finger base

フィンガは平面状の 2 リンクで構成され、その表面には厚さ 5 [mm] の「アクリル・ウレタン・ゴム」の共重合発砲体の衝撃吸収フォームが貼付されている。この左右フィンガは折りたたみ可能な構造をなしており、把持対象物

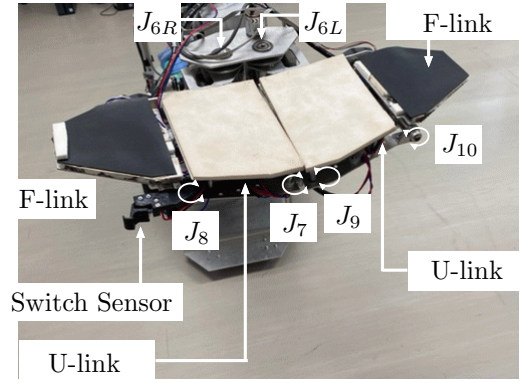


図 5 Photograph of proposed robot hand

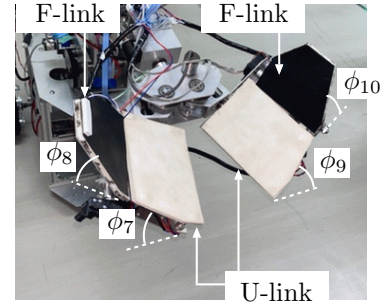


図 6 Angles of finger links

と接触する部分である。フィンガの指先に相当するリンク部分を F-link、根元のリンクを U-link とする。左右の U-Link の回転軸となる J_7, J_9 の駆動のため、モータ (ツカサ電工 TG-85E-KU-113-KA, 24V) と、エンコーダ (日本電産コパル電子, REC20D-50-201-1) が備えられる。また、指先に相当する F-link を駆動する J_8, J_{10} も、モータ (ツカサ電工, TG-85E-KU-113-KA, 24V) とエンコーダ (日本電産コパル電子, RE12A-100-100-1) が備えられる (Fig. 6)。左右の F-Link 内側には 4 枚の感圧フィルムセンサ (INTERLINK ELECTRONICS Inc., FSR406) が取り付けられ、また、U-Link 内部には 1 枚の感圧フィルムセンサ (Tekscan Corp., A201, High 445N) が取り付けられ、これらを用いて物体からの抗力を検知する。また、U-Link の内側にリミットスイッチを装備しており、フィンガの回転動作の停止制御に利用している。フィンガ角 ($\phi_7 \sim \phi_{10}$) は独立して制御が可能である。これらの関節可動領域は $-90 [\text{deg}] \leq \phi_7, \phi_9 \leq 90 [\text{deg}]$, $-180 [\text{deg}] \leq \phi_8, \phi_{10} \leq 60 [\text{deg}]$ である。

F-Link (J_8 横) には 3D プリントを用いて作成されたスイッチ機構が取り付けられており、スイッチセンサ (オムロン D2F-01L-D) が装備されている (Fig. 7)。この機構はハンドにより、物体の「かき出し動作」を行う際に使用する。本機構のリンクは樹脂製であり、物体の接触に応じて曲がり、このリンクを介して物体との接触をスイッチセンサにて検知する。第 3. 章にて後述するリングファイル取り出しの動作にはこのパーツを利用する。

フィンガは土台となるフィンガベース (Finger base, Fig. 4) に取り付けられる。このフィンガベースにも

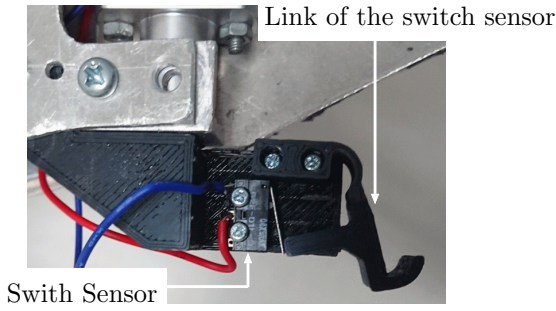


図7 Switch sensor system for pulling out an object

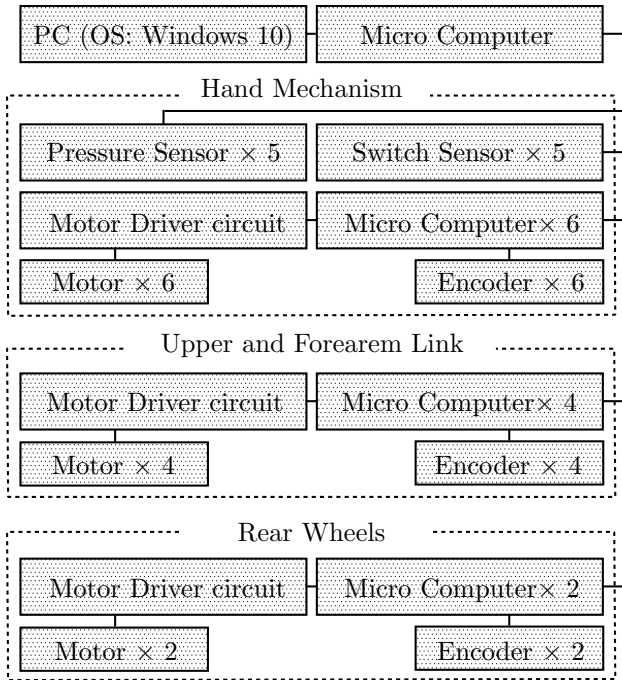


図8 System configuration of the robot

モータ（ツカサ電工, TG-101C-GU-581-KA, 24V）とエンコーダ（日本電産コパル電子, RE12A-100-100-1）が装備される．左右のフィンガの開閉は回転軸（ J_{6L} , J_{6R} ）を用いて行われ、これらの軸は上記の1つのモータで駆動される．フィンガの開閉角 ϕ_6 (Fig. 5) の関節可動領域は、 $-10 \leq \phi_6 \leq 50$ [deg] の範囲で変化可能である．

フィンガベースはリスト（手首部分, Wrist）につながれている (Fig. 4)．リストにはモータ（ツカサ電工, TG-101C-GU-581-KA, 24V）とエンコーダ（日本電産コパル電子, RECW20D-25-201-1）が装備される．このリストとの回転軸, J_5 , はフィンガベースとフィンガの部分の一体として回転させ、その関節可動領域は、 $0 \leq \phi_5 \leq 180$ [deg] である．

Fig. 8 にロボットのシステム構成図を示す．ロボットの車体駆動部（2自由度）、マニピュレータ（4自由度）、ハンド（6自由度）のモータはそれぞれモータドライバ回路（Cytron Co., Ltd., MD10C）につながれる．各モータドライバ回路と各エンコーダは、マイコン（Arduino Leonard）につながれる．これらは別のマ

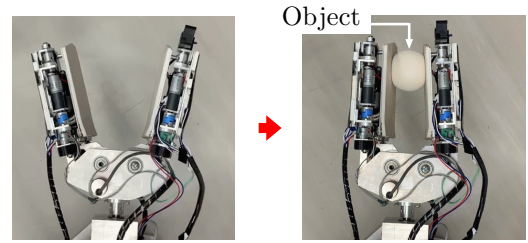


図9 Pinching motion using the robot hand

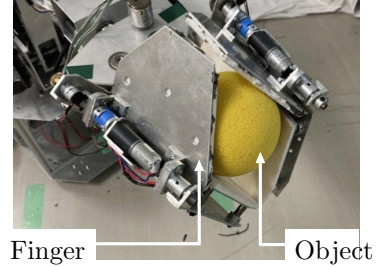


図10 Grasping motion performed by robot hand

イコン（Arduino Leonard）につなわれ、そのマイコンにはハンドに搭載したスイッチセンサ、感圧センサがつながれる．そして、PC (OS: Windows 10) を用い、C 言語にて開発したプログラムを用いてロボットを制御している．

2.1 つまみ動作とつかみ動作

人間は小物体に対して、2,3本の指でつまみ動作を行うことで、物体をハンドリングする．本ロボットによる「つまみ動作」はフィンガ角（ $\phi_7 \sim \phi_{10}$, Fig 6）を $\phi_7 = 90$ [deg], $\phi_8 = -180$ [deg], $\phi_9 = 90$ [deg], $\phi_{10} = -180$ [deg]）として折りたたみ、その後、左右フィンガの開閉（ ϕ_6 , Fig. 4）を利用して、人間の指によるつまみ動作を模倣することで物体ハンドリングを行う (Fig. 9)．

また、人間は手に対して比較的大きな物体に対しては「つかみ動作」を行う．本ハンド機構では、左右のフィンガ角（ $\phi_7 \sim \phi_{10}$ ）を変化させ、把持対象物をフィンガで包み込むことで「つかみ動作」を行う (Fig. 10)．

3. 実験

本立てに配置されたリングファイルの取り出し実験を行った．本実験ではファイルが立てて配置され、その上部空間が開けている環境とする．また、把持対象物の形状を既知とし、把持対象とするリングファイルの左右には、別のファイルや本や冊子が立ててあることで、ハンドがリングファイルを引くと左右冊子からの摩擦力により、その状態で保持される状況を仮定し、実験を行なった．本実験にて把持対象としたリングファイルは 307 [mm]（縦） \times 250 [mm]（横） \times 44 [mm]（厚さ）、260 [g] である．

Fig. 11(1)～(10)で示されるリングファイル取り出しプロセスを以下に示す．(1) ロボットがファイル取り出しを行う位置にて停止する．(2) 左右フィンガを $\phi_7 = -90$ [deg], $\phi_8 = -180$ [deg], $\phi_9 = 90$ [deg], $\phi_{10} = -180$

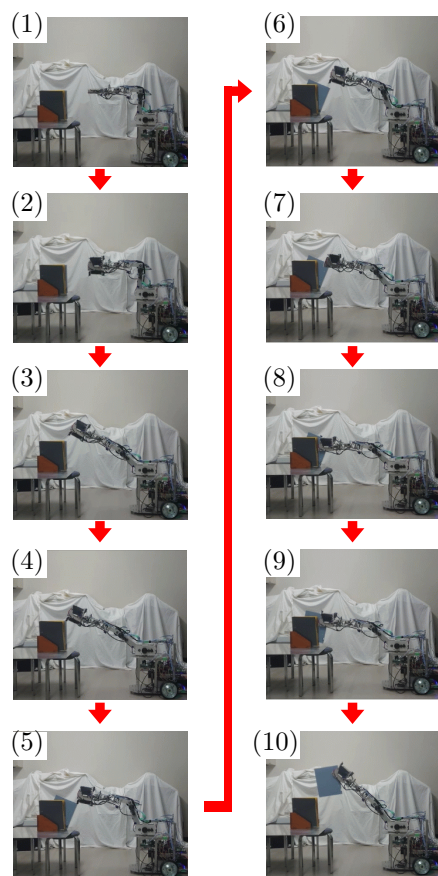


図 11 Experiment

[deg]) として折りたたむ．その後， $\phi_6 = -10$ [deg] として，左右フィンガを接触させる (Fig. 12 (a))．(3) マニピュレータの肩関節 (J_1) と肘関節 (J_3) を動作させ，ハンドの位置をファイルの上方へと移動する．(4) 肩関節 (J_1) を動作させ，ハンドを下方に降ろす．ハンドに取り付けられているスイッチセンサ機構 (Fig. 7) がハンドとファイルの接触を検知する．(5) 肩関節 (J_1) と肘関節 (J_3) を動作させ，ハンドをロボット側に引く．リングファイルの傾斜が増大し，ハンドのスイッチセンサ機構からリングファイルが外れる．リングファイルはそのファイルの左右冊子からの摩擦力で斜めの状態で保持される．(6) 肩関節 (J_1) と肘関節 (J_3) を動作させ，ハンドをリングファイルの上方へ移動する．(7) $J_7 = 90$ [deg]，また， $\phi_6 = 45$ [deg] として，左右フィンガを開く (Fig. 12 (b))．それと同時にハンドをファイルを挟める高さまで降ろす．(8) J_7, J_9 を駆動し，左右フィンガを閉じ，リングファイルをつまむ．(9) 肩関節 (J_1) と肘関節 (J_3) を動作させハンドをファイルの上方へ移動する．(10) ファイル取り出しを終了する．

このハンドリング法を用いることでファイルの取り出しが可能であることが明らかとなった．一方，実験において，ファイルをつかみ，持ち上げる際に，ファイルが一部滑る現象が見られることがあった．そのため，ハンドリング時の滑りを検知し，物体の質量に応じて，適切な把持力を制御するシステムが必要であることが明らかとなった．

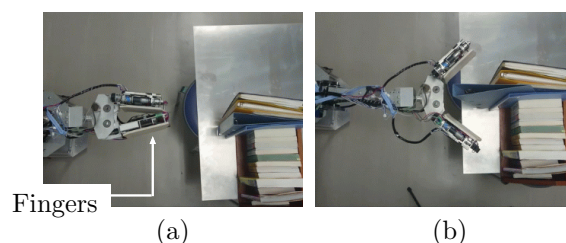


図 12 Fingers in process of taking out the ring file, (a) Situation of both fingers attached together, (b) Situation of fingers are opened for grasping the ring file

4. 結言

本報告では折りたたみ可能な平面機構を有する 6 自由度ロボットハンドシステムと本棚からの取り出し戦略に関する報告を行なった．実験により，提案手法を用いて，配置してあるリングファイルの取り出しが可能であることを示した．今後，ハンドリング時の滑りを検知し，物体の質量に応じて適切な把持力を制御するシステムを構築し，その動作精度の向上を実現する．

謝 辞 本研究の一部は科研費 (課題番号: 18K04070) の助成を受けて行われました．

参 考 文 献

- [1] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai, S. Ito: "Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III, International Conference on Control", Automation and Systems, Jeonbuk, pp.1288-1293 (2002)
- [2] A. Bicchi: "Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Toward Simplicity", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Vol.16, No.6, pp.-652-662 (2000)
- [3] Walter G. Bircher, Andrew S. Morgan, Aaron M. Dollar: "Complex manipulation with a simple robotic hand through contact breaking and caging", Science Robotics, Vol. 6, Issue 54, DOI: 10.1126/scirobotics.abd2666 (2021)
- [4] S. Yuan, L. Shao, C. L. Yako, A. Gruebele and J. K. Salisbury: "Design and Control of Roller Grasper V2 for In-Hand Manipulation", 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.9151-9158 (2020)
- [5] 池田, 山口, 上田, 佐伯, 坂本, 金子, 佐藤: "折りたたみ可能な平面機構を有するロボットハンド -ハードウェアの概要と人間の手の模倣戦略-", 日本ロボット学会誌 Vol.39, No.5, pp.463-466 (2021)