

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420193

研究課題名(和文) 手首が柔らかい4本指ハンドを備えた6脚作業移動ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of working six-legged robots with soft wrists and four-fingered hands

研究代表者

井上 健司 (Inoue, Kenji)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40203228

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)：すべての脚先に手首が柔らかい4本指ハンドを備えた6脚作業移動ロボットを開発した。手首の柔らかさと放射状に開閉する4本指ハンドの特徴を生かして、片腕または両腕のハンドによる小物体や長尺物体の把持、ハンドを広げた状態での6脚步行、ボディを立てハンドを広げた状態での直立4脚步行、凹凸地形の凸部分をハンドで掴みながら移動する方法、梯子の踏棧や支柱をハンドで掴みながら移動する方法、4脚で構造物にぶら下がり腕に転用した2脚で腕作業する方法、ジェスチャによる遠隔操作インタフェースを実現し、超音波非破壊検査への応用可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：A working six-legged robot with soft wrists and four-fingered hands is developed. Taking advantages of the soft wrists and the fingers radially opening and closing, the following functions are realized: handling small and long objects with one or two hands, six-leg walking with the hands opened, upright four-leg walking with the hands opened, moving on rough terrain by grasping bumps with the hands, moving on ladders by grasping their supports and rungs with the hands, manipulation using two legs which can be regarded as arms with hanging from structures using other four legs, and gesture interface for teleoperation. The robot is applicable to ultrasonic nondestructive inspection.

研究分野：ロボット工学

キーワード：6脚ロボット 多指ハンド 歩行 マニピュレーション 遠隔操作 超音波非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震等により半壊した建物の内部探査や要救助者捜索、原子力発電所や化学プラントの保守点検など、人が入れない場所や危険な環境で活動するロボットの開発が期待されている。半壊した建物内では、階段・梯子等の移動用の構造物が壊れていたり、崩れた壁や柱が瓦礫となって散乱していたり、進路を塞いでいたりする。よってロボットには、こうした地形を踏破し、時には障害物を排除して進む高い移動能力が必要となる。しかも、内部の状況を事前に知ることはできないため、臨機応変に対応できる汎用的な作業能力、すなわち物を持ち上げて動かしたり測定器やセンサを検査箇所近づけたりするための腕の機能が重要となる。

(2) これまでに、屋外不整地の移動、階段昇降が可能なロボットや、災害現場で要救助者捜索を行うロボットがいくつか開発された。ただし、これらの多くは移動機構としてクローラを採用しており、荒地・瓦礫上などの連続した不整地の移動が目的であった。また、1ないし2本の腕を移動機構に搭載したロボットが開発されているが、腕が伸ばせる方向が限定されるなど、作業の汎用性・柔軟性に問題があった。

(3) 脚は、凹凸の激しい地形や不連続な地形も踏破できるなど、高い移動能力を有する。さらに、脚の一部を腕に転用することで、汎用・柔軟な作業能力も発揮できる。この考えに基づき、我々は6脚の作業移動ロボットを開発している。ロボットは、高速安定な移動が可能な6脚モード、ボディを横にして前部2脚を腕に転用し、低所2腕作業+4脚移動を行う水平4脚2腕モード、ボディを縦にして上部2脚を腕に転用し、高所2腕作業+4脚移動を行う垂直4脚2腕モードの3つのモードを切り替えて、状況に応じた移動と作業を行う。ただし、これまでのロボットはハンドを持たないため、2腕で物体を挟む程度の作業能力しかなかった。

2. 研究の目的

(1) ロボットのすべての脚先にハンドを取り付ければ、地形や構造物、物体を掴むことができるようになり、ロボットの移動能力・作業能力は向上する。さらに、脚先とハンドの間(以下、手首と呼ぶ)を柔らかくすることで、構造物を掴んだときの過負荷を防止し、ハンドを開いて接地したときの安定性を高めることができる。

(2) 本研究では、すべての脚先に手首が柔らかい4本指ハンドを備えた6脚作業移動ロボットを開発する。手首の柔らかさと放射状に開閉する4本指ハンドの特徴を生かし、以下の移動能力・作業能力を実現する。なお、本稿では、作業に用いる脚を腕と呼称する。

- ① 腕または2腕のハンドにより、小物体や長尺物体を把持する。
- ② 脚のハンドを開いた状態で6脚步行する。
- ③ 垂直4脚2腕モードで、脚のハンドを開いた状態で直立4脚步行する。
- ④ 凹凸地形の凸部分を脚のハンドで掴みながら6脚で移動する。
- ⑤ 梯子の踏棧や支柱を脚のハンドで掴みながら6脚で移動する。
- ⑥ 垂直4脚2腕モードで、4脚を上にして構造物にぶら下がり、下部の2腕で作業する。
- ⑦ ジェスチャで腕とハンドを遠隔操作する。
- ⑧ 1腕のハンドで超音波探触子を把持して構造物に押し付け、超音波非破壊検査を行う。

3. 研究の方法

(1) すべての脚先に手首が柔らかい4本指ハンドを備えた6脚作業移動ロボットを開発する。ロボットの概略を図1に示す。ロボットは、ボディの片側に4脚、反対側に2脚を持つ。これまでの研究で、全ての脚を使って高速安定に移動する6脚モード、ボディを横にして腕1・2による低所2腕作業+脚3・4・5・6による4脚移動を行う水平4脚2腕モード、ボディを縦にして腕5・6による高所2腕作業+脚1・2・3・4による4脚移動を行う垂直4脚2腕モードを実現した。本研究では、ハンドにより1腕でも作業ができるため、脚1または2を腕に転用して残りの5脚で移動する5脚1腕モードも可能となる。

図2のように、ひとつのハンドの4本の指は、ボディに置かれた1個のモータで、同期して放射状に開閉する。ハンドは、物体を把持するだけでなく、地形や構造物を掴んで移動する、ハンドを開いた状態で安定に着地するなど、移動可能な地形の拡大や移動の安定性向上にも寄与する。手首に柔軟な部材を介してハンドを脚先と連結し、物体の向きや地形になじむ効果を発揮する。

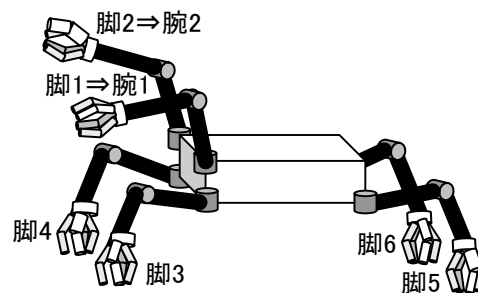


図1 ロボットの概略

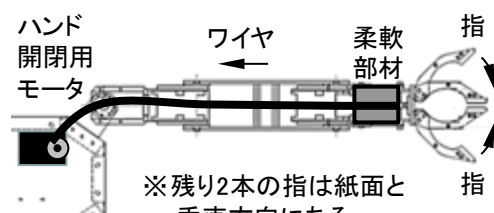


図2 4本指ハンドの概略

(2) 1 腕または 2 腕のハンドによる小物体や長尺物体の把持能力を検証する。

(3) 脚のハンドを開いた状態での 6 脚歩行を検証する。

(4) 垂直 4 脚 2 腕モードにおける脚のハンドを開いた状態での直立 4 脚歩行法を開発する。ハンドを開いて 4 本指で接地すると、接地領域が広がり、2 脚でも立つことができる。そこで、対角の脚 1・4 と脚 2・3 を組みにして交互に動かし、直立歩行する。

(5) 凹凸地形の凸部分を脚のハンドで掴みながら 6 脚で移動できるかを検証する。

(6) 梯子の踏棧や支柱を脚のハンドで掴みながら 6 脚で移動する方法を開発する。脚 5・6 で上側の踏棧を、脚 3・4 で下側の踏棧を、脚 1・2 で両側の支柱を掴み、これらを順に動かして梯子の上を移動する。

(7) 垂直 4 脚 2 腕モードの 4 脚を上にして構造物にぶら下がり、下部の 2 腕で作業する方法を提案する。

(8) 人の手と指先の 3 次元位置を取得できる小型モーションコントローラを用い、操作者の両手の動きで水平 4 脚 2 腕モードにおける 2 腕とそれらのハンドを遠隔操作するインタフェースを構築する。

(9) ロボットを超音波非破壊検査に応用する。5 脚 1 腕モードの 1 腕のハンドで、探触子を埋め込んだアダプタを把持する。アダプタに取り付けた接触センサで構造物への接触を検出し、ロボットを制御して探触子を垂直に押し付ける。超音波厚さ計測の実験を行い、性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 開発したロボットを図 3 に示す。ハンドを除く各脚の自由度は 3 で、各脚の第 1 関節は、ボディを中心とする 240 [mm] × 160 [mm]



図 3 開発したロボット (5 脚 1 腕モード)

×61 [mm] の直方体の頂点にある。脚はすべて同じサイズで、一直線に伸ばしハンドを閉じた状態で、第 1 関節からハンド先端までの長さは 417 [mm] である。

手首が柔らかい 4 本指ハンドとそのサイズを図 4 に示す。4 本指の根元は中央で連結されており、この連結部分を図の赤矢印方向に引っ張ると、4 本指は一斉に閉じる。連結部分は、チューブの中を通したワイヤを介してボディに置かれたモータに繋がっており (図 2 参照)、モータでワイヤを巻き取ることで引っ張る。また、ワイヤを緩めると、バネの力で 4 本指は一斉に開く。手首の柔軟素材には、コンパクトで 3 方向に曲げ・ねじり変形ができるラジコン用ゴムタイヤを用いた。

(2) 1 腕のハンドによる小物体把持の様子を図 5 に示す。4 本指が四方から物体を包み込むことで、安定に把持できている。

図 6 は、2 腕のハンドによる長尺物体の把持である。指先が閉じても、指の中央部分には空間がある。この部分で物体を把持すれば、長尺物も安定に把持できる。ただし、指の先

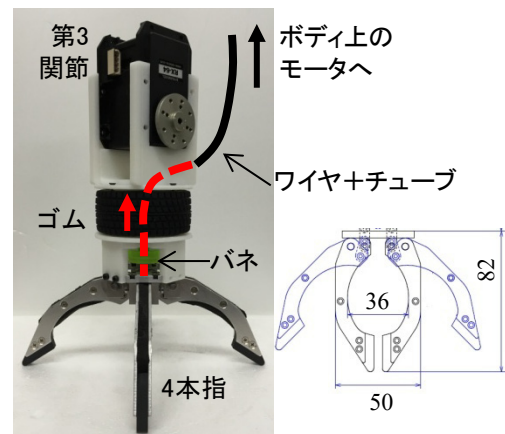


図 4 開発した手首が柔らかい 4 本指ハンド

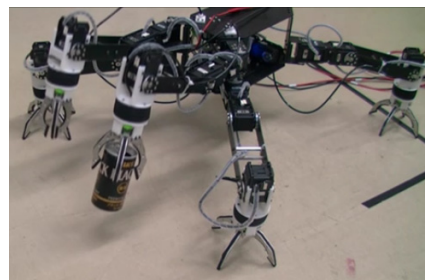


図 5 1 腕のハンドによる小物体の把持

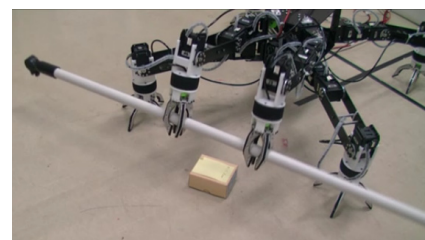


図 6 2 腕のハンドによる長尺物体の把持

端で把持する場合、物体が滑りやすいと把持できなかった。指先に滑りにくいゴムをつけるなど、工夫が必要である。

(3) 脚のハンドを開いた状態で6脚步行する様子を図7に示す。手首の柔らかさの効果で、4本指接地が維持できている。

(4) 垂直4脚2腕モードにおける脚のハンドを開いた状態での直立4脚步行の様子を図8

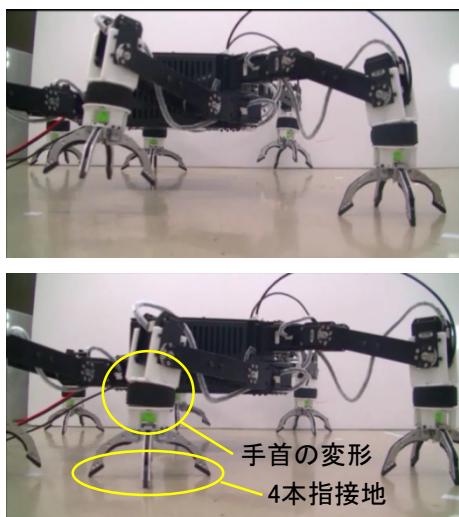


図7 ハンドを開いた状態での6脚步行

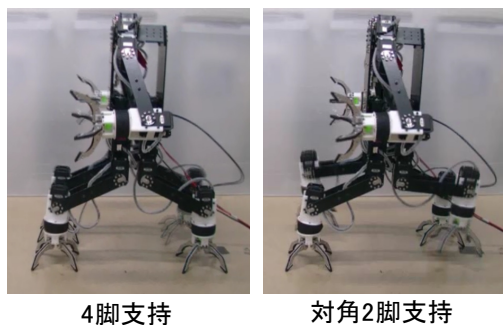


図8 ハンドを開いた状態での直立4脚步行

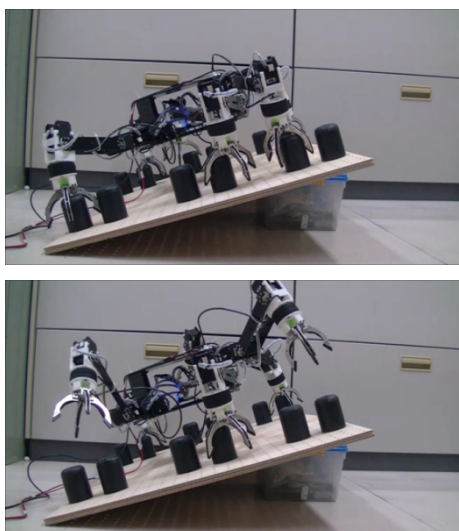


図9 凹凸地形の6脚步行

に示す。手首の柔らかさの効果で4本指接地を維持できるため、対角の2脚で立っても広い接地領域が確保できる。よって、対角の2脚を交互に動かす直立歩行を可能となった。

(5) 太さ 50[mm]のゴム製の杭を 75[mm]間隔で並べた凹凸地形を作り、脚のハンドで杭を掴みながら6脚で移動させた。登坂可能な最大斜度20[deg]を移動する様子を図9に示す。把持が十分でないハンドもあるが、手首の柔らかさが杭と脚の位置ずれに対応している。斜度がきつくなるとこの位置ずれが大きくなり、歩行不可能となった。

(6) 直径 30[mm]のパイプで支柱間隔(横幅) 300[mm]、踏棧間隔 150[mm]の梯子を作り、脚

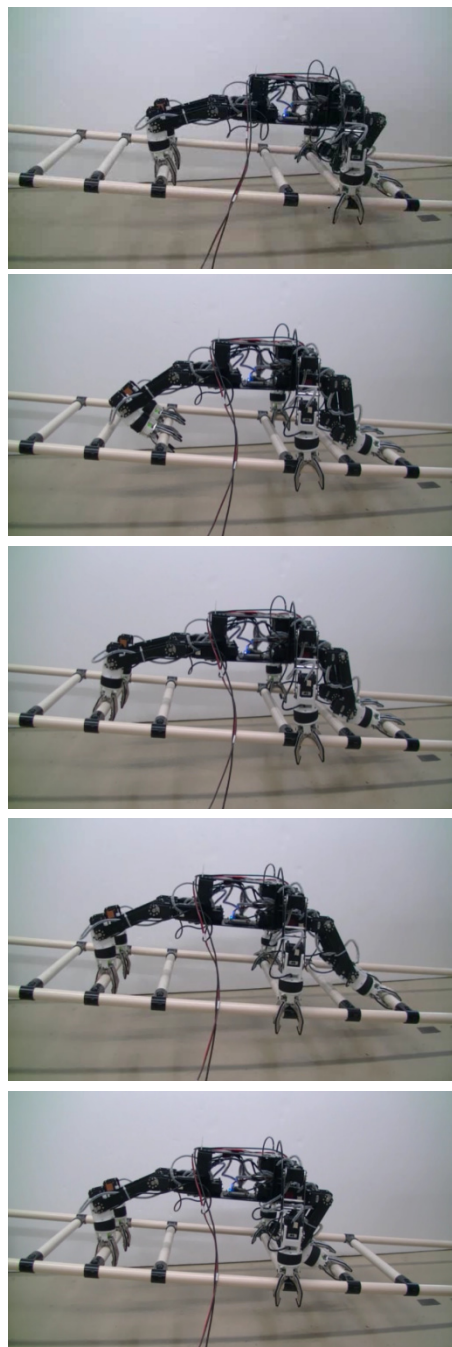


図10 梯子上の移動

5・6 で上側の踏棧を、脚 3・4 で下側の踏棧を、脚 1・2 で両側の支柱を掴みながら梯子の上を移動させた。傾き 10[deg]の梯子を移動する様子を図 10 に示す。凹凸地形の移動と同様に、手首の柔らかさが踏棧・支柱と脚の位置ずれを吸収し、ハンドでしっかり把持できている。傾くが大きくなると移動できなくなる理由は凹凸地形と同じで、最大傾きは 10[deg]であった。

(7) 垂直 4 脚 2 腕モードの 4 脚を上にして構造物にぶら下がっている様子を図 11 に示す。ハンドの把持力不足のため、ハンドで構造物を握ってぶら下がることはできなかったが、図のように 4 脚で構造物に抱きつくことで、ぶら下がりが可能となった。この方法のほうが、構造物の太さの違いに対応できるという利点がある。その結果、構造物からぶら下がった状態での下部 2 腕による作業が可能となった。

(8) 人の手と指先の 3 次元位置を取得できる小型モーションコントローラを用い、水平 4 脚 2 腕モードにおける 2 腕のハンドの 3 次元位置と開閉を遠隔操作するインタフェースを構築した。図 12 のように、操作者の右手を前後・左右・上下に動かすと、同期して腕 2 のハンドが移動する。また、親指と人差指を離したり近づけたりすると、ハンドが開閉する。同様に、操作者の左手で脚 1 のハンドも遠隔操作できる。

(9) ロボットを超音波非破壊検査に応用した。ハンドで探触子を把持するために開発したアダプタを図 13 に示す。アダプタ中央に探触子があり、探触子を囲むように 4 個の棒状の接触センサが、探触子の背後に 1 個の接触センサが埋め込まれている。5 脚 1 腕モードの 1 腕のハンドでアダプタを把持し、接触センサで構造物に対する探触子の傾きを検出しながら、ロボットを制御して探触子を構

物に垂直に押し付ける。

厚さ 15.0[mm]のアルミ板の厚さを超音波計測する実験を行った。実験の様子を図 14

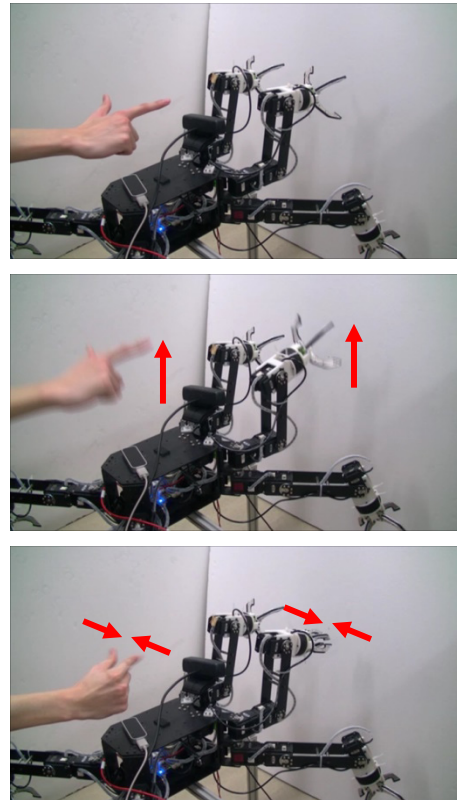


図 12 腕とハンドのジェスチャ遠隔操作

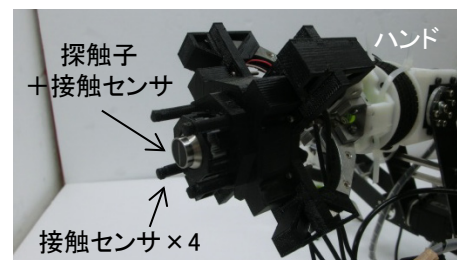


図 13 超音波探触子アダプタ

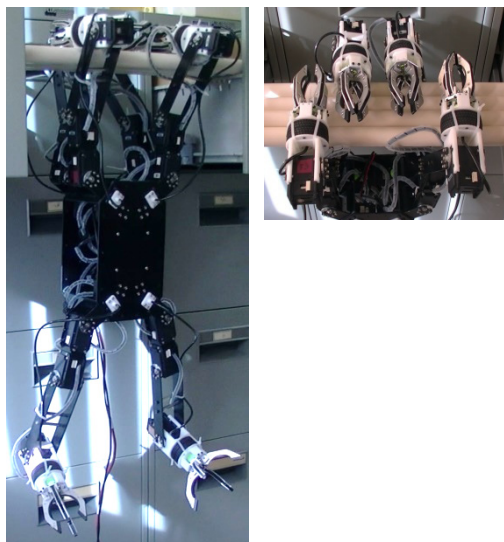


図 11 構造物からのぶら下がり作業

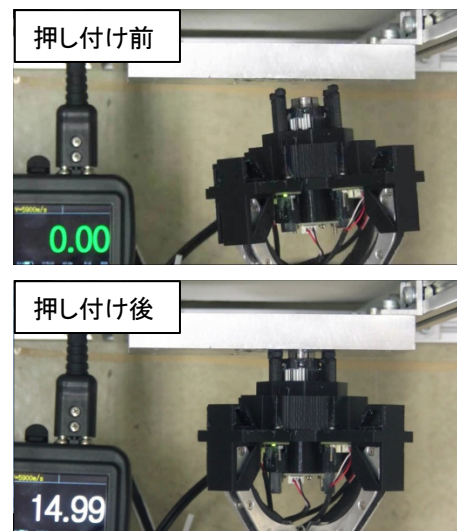


図 14 超音波厚さ計測実験

に示す。10 回計測した結果、平均値は 15.1[mm]であった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ①高津 陽太、井上 健司、小型モーションコントローラを用いた 2 腕ロボットのジェスチャ遠隔操作、日本機械学会東北支部第 52 期総会・講演会、2017 年 3 月 14 日、東北大学 (宮城県・仙台市)
- ②辻 絢人、井上 健司、ロボットによる超音波探触子の垂直押し付け法、計測自動制御学会東北支部第 306 回研究集会、2016 年 12 月 10 日、東北大学 (宮城県・仙台市)
- ③佐々木 洸太、井上 健司、手首が柔らかい 4 本指ハンドを備えた 6 脚作業移動ロボットの開発、計測自動制御学会東北支部第 297 回研究集会、2015 年 10 月 23 日、山形大学 (山形県・米沢市)
- ④Kenji Inoue、Masashi Kaminogo、Steep Slope Climbing Using Feet or Shins for Six-Legged Robots、10th Asian Control Conference 2015、2015 年 5 月 31 日～6 月 3 日、コタキナバル (マレーシア)
- ⑤Juthamas Kroswas、Kenji Inoue、Proposal of Gesture Based Teleoperation System for Six-Legged Robots with Multiple Modes、計測自動制御学会東北支部 50 周年記念学術講演会、2014 年 12 月 11 日、東北大学 (宮城県・仙台市)

[その他]

ホームページ等

<http://bio-robot.yz.yamagata-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 健司 (INOUE, Kenji)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：4 0 2 0 3 2 2 8