

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 6月 8日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560256

研究課題名（和文） 3つのモードを切り替え可能な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 Capable of Switching Three Modes

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

研究成果の概要（和文）：3つのモードを切り替えることで、高い移動能力と作業能力を発揮する6脚作業移動ロボットを開発した。6脚モードでは、全方向6脚步行と超音波センサを用いた障害物回避、段差昇降、急斜面登りを、ボディを横にして前部2脚を腕に転用する水平4脚2腕モードでは、全方向4脚步行と低所2腕作業を、ボディを縦にして上部2脚を腕に転用する垂直4脚2腕モードでは、直立4脚步行、高所2腕作業、大型物体の押し搬送を実現した。

研究成果の概要（英文）：A working six-legged robot which can switch three modes is developed. Three modes enhance mobility and working ability of the robot. The following functions are implemented and tested. In six-leg mode, omni-directional walking with six legs, obstacle avoidance with ultrasonic sensors, climbing up/down steps and climbing up steep slope. In horizontal four-leg two-arm mode where two front legs are used as arms with the body horizontal to the ground, omni-directional walking with four legs and low-level manipulation with two arms. In vertical four-leg two arm mode where two upper legs are used as arms with the body vertical to the ground, walking upright with four legs, high-level manipulation with two arms and large object pushing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：6脚作業移動ロボット、6脚步行、4脚步行、直立歩行、障害物回避、段差昇降、急斜面登り、物体押し搬送

1. 研究開始当初の背景

地震・事故により半壊した建物の内部探査・被災者捜索など、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・梯子など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。しかも、内部の状況を事前に知ることは

できない。よってロボットには、様々な地形を移動できる能力と、障害物を排除・移動させる腕の機能が必要となる。また、エネルギー効率や可動時間の点で、ロボットが小型軽量であることも重要である。

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、災害現場で被災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・瓦礫上といった連続した不整地の移動が目的であった。クローラは、凹凸の間隔がクローラより十分短い地形しか踏破できないため、階段などを移動するには長いクローラが必要となり、ロボットが大きくなる。その結果、小回りが利かない、狭い空間に入れないといった欠点がある。一方、狭い瓦礫内への進入や配管内の移動、木登り、ビル壁面の移動を行うロボットも開発されている。これらは、吸盤吸着機構など環境に特化した専用の機構を用いており、想定する状況では優れた能力を発揮できるが、様々な地形の移動や作業のバリエーションが求められるケースには対応できない。作業能力については、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、作業の柔軟性・汎用性に問題がある。

2. 研究の目的

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、高い対地適応性を有する。腕は、人間のように臨機応変に対応できる汎用的な作業能力を発揮できる。しかし、これまでのロボットの多くは、移動機構に腕を搭載した構造をしており移動（脚）と作業（腕）を別々に扱っていた。

本研究では、3つのモードを切り替えることで、高い移動能力と作業能力を発揮する6脚作業移動ロボットを開発する。

このロボットの第1の特徴は、脚と腕を区別するのではなく両者を兼用する点にある。すなわち、脚による高い対地適応性を有しながら、脚の一部を腕に転用することで腕による汎用的な作業能力も発揮できる。また、ロボットの小型軽量化も可能となる。第2の特徴は、ボディに対する脚の取り付け位置を工夫し、移動に適した6脚モード、低所2腕作業に適した水平4脚2腕モード、高所2腕作業に適した垂直4脚2腕モードの3つのモードを切り替え可能にしている点である。第3の特徴は、2つの4脚2腕モードにより、水平方向だけでなく垂直方向にも広がった腕の作業領域を実現している点にある。

このように、移動機能と作業機能を合わせて考え、両者のバランスよい統合と相補的な拡大を目指す。

3. 研究の方法

(1) 6脚作業移動ロボットを開発する。ロボットは、各脚に3自由度ずつ、計18自由度を持つ。関節のアクチュエータには、制御機能を内蔵したインテリジェントサーボモータを採用し、メインコンピュータでロボットの動作を生成して各モータに指令する。各脚先には、脚の接地を検出する力センサと障害物を検出する超音波センサを搭載する。

(2) 平面上を全方向に移動可能な6脚步行法を開発する。歩行には、3脚ずつを組にして、交互に支持脚と遊脚を切り替えるトライポッド歩容を用いる。この歩行法では、歩行中の任意のタイミングで、ボディの並進回転速度と地面に対するボディの高さを指令する。指令速度から、支持脚と遊脚の動作を実時間で生成し、必要ならば支持脚の組と遊脚の組を入れ替える。支持脚と遊脚の動作は、ボディの高さに応じて変化する。

(3) (2)の6脚步行を行いながら、脚先の超音波センサを用いて周囲の障害物を検出し、障害物を自律的に回避する方法を開発する。超音波センサは、センサを向けた方向の距離しか測定できない。そこで、進行方向の障害物を検出するために、1本の脚が常に進行方向を向くように歩行動作を補正する。さらに、過去から現在までの計測データを重ね合わせ、周囲の環境形状マップを生成する。環境形状マップを用い、障害物を回避する軌道を生成する。

(4) ボディを傾けながら、6脚を用いて横向きに高い段差を昇降する方法を開発する。ボディを段差に平行にした状態から傾け、段差に近い脚を上方に伸ばして着地させる。ボディを斜めに押し上げて段差の上に移動させ、ボディを一旦段差に着地させた後、すべての脚を段差に着地させる。このプロセスを逆向きに行えば、段差を降りることもできる。

(5) (2)の6脚步行では不可能な急斜面を登る方法を開発する。急斜面では、ロボット重心の斜面への投影点が斜面下方に偏ってしまうため、安定領域を斜面下方に広げる必要がある。そこで、機構の特徴を生かし、4脚を斜面下方の同じ高さに、2脚を上方に置いて安定領域を確保し、急斜面を登る。

(6) 水平4脚2腕モードおよび垂直4脚2腕モードにおけるその場での2腕マニピュレーション法を開発する。2腕で物体を把持して動かすことを目的として、遠隔操作により、2腕を協調させた手先の3次元並進移動と手先の間隔の調整を行う。

(7) 水平4脚2腕モードにおける4脚歩行法を開発する。水平4脚2腕モードでは、作業を行う2腕の動きに協調して4脚歩行する必要がある。そこで、歩行パターンを予め定めずに、支持脚の中で可動限界に到達した脚から順に遊脚にするという行動原理を用い、任意の指令速度に応じた全方向移動を可能にする。

(8) 垂直4脚2腕モードで、ボディを縦にした直立姿勢で4脚歩行する方法を開発する。この歩行は、上部2腕で物体を把持して移動したり、縦長の隙間に入る際に有効となる。脚を1本ずつ動かすクロール歩容を基本とし、脚先力センサで抜重を検出しながら歩行する。直立姿勢では前後の脚を接近させて着地できるため、スムーズな重心移動が可能となる。

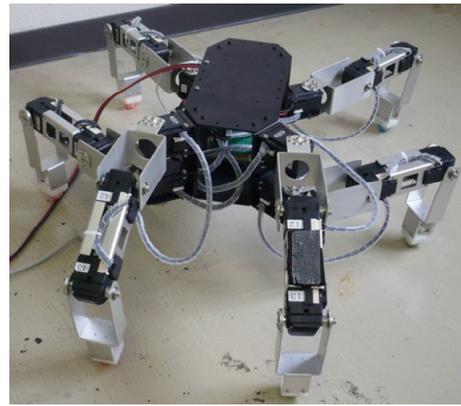
(9) 垂直4脚2腕モードで、大型物体を押しながら搬送する方法を開発する。上部2腕とボディを使って物体を把持し、物体に寄りかかるようにして体重を加えることで、6脚モードや水平4脚2腕モードよりも大きな力で物体を押しすることができる。下部4脚は左右対称に動かし、横方向のバランスを保つ。さらに、脚先力センサで脚の滑りや抜重を検出したら、支持脚と遊脚を切り替え、常に押し続けるように制御する。

4. 研究成果

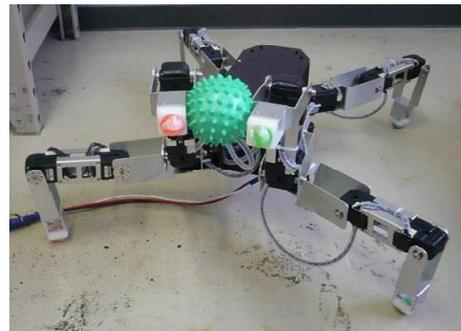
(1) 開発したロボットと3つのモードを図1に示す。図1(a)のように、直方体のボディの下面四隅に4脚を、上面二隅に2脚を取り付ける。通常の6脚ロボットでは、同じ平面(下面)上に6脚が取り付けられているのに対し、本ロボットは、上記のような空間的な脚配置を持つ。その結果、高速安定な移動に適した6脚モード、低所2腕作業+4脚移動が可能な水平4脚2腕モード、高所2腕作業+4脚移動が可能な垂直4脚2腕モードの3つのモードが実現できる。

ロボットは1号機と2号機があり、1号機のすべての脚先には、新たに開発した脚の接地検出用の小型力センサが付いている。図2のように、このセンサは、力伝達要素に球体を用いることで、脚先端が傾いて地面に接触しても脚の接地を検出できる。実験により、歩行中の接地の有無を確実に検出できることを確認した。図3のように、2号機のすべての脚には、障害物までの距離を測定する超音波センサを搭載している。

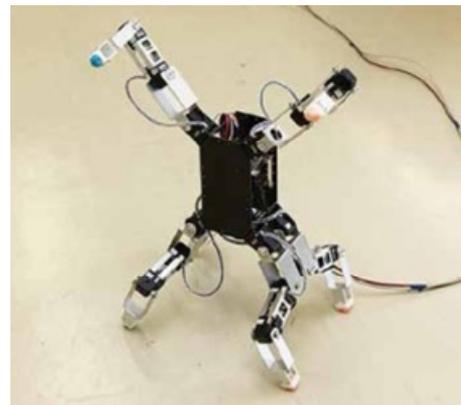
(2) 平面上の6脚歩行法をロボットに実装した。ジョイスティックを用いてボディの指令速度を入力すると、ロボットの動作が実時間で生成され、ロボットが指令通りに移動す



(a) 6脚モード



(b) 水平4脚2腕モード



(c) 垂直4脚2腕モード

図1 3つのモードを切り替え可能な6脚作業移動ロボット

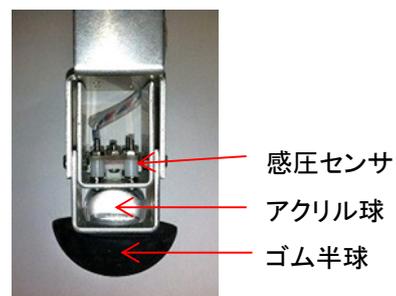


図2 脚先力センサ



図3 脚先超音波センサ



図4 天井の低い隙間への進入

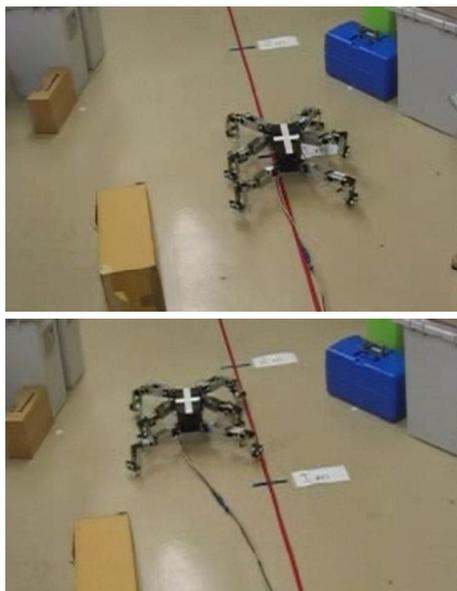


図5 脚先超音波センサを用いた障害物回避

ることを確認した。また、ボディの高さを変化させても、高さに応じた脚の動作が実時間で生成できた。図4は、ボディの高さを変えて天井の低い隙間に進入する例である。実験から、高さ 165[mm]の隙間に進入することができた。

(3) 脚先の超音波センサを用いた障害物回避法をロボットに実装した。図5のように、複数の障害物を置いた環境で実験を行い、自律



図6 段差昇降



図7 急斜面登り

的に障害物を回避しながらゴールに到達できることを検証した。

(4) 高い段差を昇降する方法をロボットに実装した。ボディを傾けながら横向きに段差を登ることで、一般的な階段の高さよりも高い 197[mm]の段差を昇降できた。段差昇降の様子を図6に示す。

(5) 急斜面を登る方法をロボットに実装した。図7のように、凹凸または摩擦のある実験用斜面で実験を行い、(2)の6脚歩行に比べて2倍の斜度が登れることを示した。

(6) 2腕マニピュレーション法をロボットに実装し、その動作を確認した。マニピュレーションの様子を図1(b)に示す。



図8 水平4脚2腕モードにおける4脚歩行

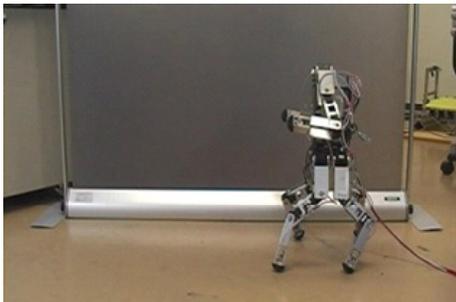
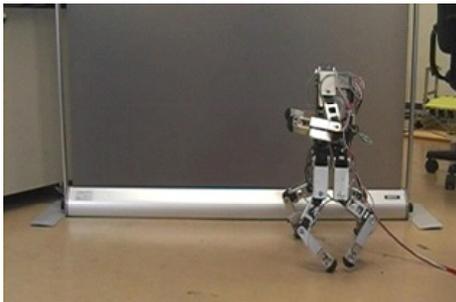
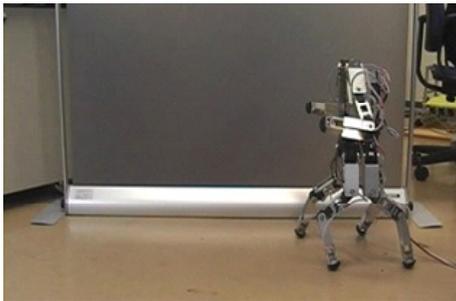


図9 垂直4脚2腕モードにおける直立4脚歩行

(7) 水平4脚2腕モードにおける4脚歩行法をロボットに実装した。歩行の様子を図8に示す。実験の結果、急な進行方向の変化にも対応できること、一定の指令速度が続くと、四足動物が自然に行うクロール歩容が生成されることを確認した。

(8) 垂直4脚2腕モードにおける直立4脚歩行法をロボットに実装した。歩行の様子を図9に示す。脚の抜重を検出しているため、



図10 垂直4脚2腕モードによる大型物体の押し搬送

2腕で物体を把持し、重心が偏った状態でも歩行できることを実験により確認した。

(9) 垂直4脚2腕モードにおける大型物体の押し搬送法をロボットに実装した。実験の結果、図10のように、ロボットより重い物体を真っ直ぐ安定に押せること、脚の滑りや抜重を検出することで、効率よく物体を押せることを確認した。

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)

[学会発表] (計8件)

- ① 伊藤剛、李秀雄、井上健司、歩行パターンを用いない4脚ロボットの全方向歩容、2012年度精密工学会春季大会学術講演会、首都大学東京(東京都八王子市)、2012/3/14
- ② 上之郷将志、李秀雄、井上健司、4脚2腕ロボットによる急斜面登り、2012年度精密工学会春季大会学術講演会、首都大学東京(東京都八王子市)、2012/3/14
- ③ 余淑芬、李秀雄、井上健司、脚先に超音波センサを搭載した6脚作業移動ロボットの障害物回避、日本機械学会東北支部第47回秋季講演会、山形大学工学部(山形県米沢市)、2011/9/22
- ④ Kenji Inoue, Kanjiro Ooe, Suwoong Lee, Pushing Methods for Working Six-Legged Robots Capable of Locomotion and Manipulation in Three Modes, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage (Alaska, U.S.A.), 2010/5/3.
- ⑤ Kanjiro Ooe, Maki Kikuchi, Suwoong Lee, Kenji Inoue, Toward Step Climbing by Working Six-legged Robots: Gait for Step Climbing and Measurement Method of Step Height, 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and

Nanotechnology, 小倉駅ホテル (福岡県北九州市), 2009/11/11.

- ⑥ 大江寛次郎、李秀雄、井上健司、6脚作業移動ロボットによる物体押し動作の解析、第27回日本ロボット学会学術講演会、横浜国立大学 (神奈川県横浜市)、2009/9/15

[その他]

ホームページ等

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

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：40203228

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：