

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06682

研究課題名(和文) 巧みなワイヤの配置による拘束を利用した2足歩行ロボットの革新的脚部機構の開発

研究課題名(英文) Development of Novel Leg Mechanism for Biped Robot using Wire-Constraints

研究代表者

白藤 翔平 (Shirafuji, Shouhei)

東京大学・人工物工学研究センター・特任研究員

研究者番号：80779330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ワイヤを用いてロボット脚の複数関節の運動を拘束することで、所望の脚軌道を実現し、ロボットの重量を機械的に支えながら歩行をおこなう、エネルギー効率の良いロボット脚構造の実現を目指した。そのなかで、ワイヤ拘束で複数関節の運動に任意の運動を生じさせるための、ワイヤの経路の導出手法を提案した。これを用いて、上記のようなロボットを実現するためのワイヤの経路を導出するとともに、歩行のフェーズに合わせて拘束の切り替えをおこなうために必要なワイヤのロック機構を提案した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research was the development the leg mechanism to realize the efficient biped walk of a robot by constraining several joint pairs using wires to follow the target trajectory and supporting the weight of robot mechanically. We proposed the design methodology of the route of wires to realize the target coordinated motion of pairs of joints by the mechanical constraints of wires. Furthermore, we determined the paths of wires to achieve the robotic leg mentioned above using the proposed method and developed the new locking mechanism to switch the wire-constrains according to the phase of walking.

研究分野：工学

キーワード：歩行ロボット 脚機構 ワイヤ拘束機構 ロック機構 非円形プーリ 平ベルト

1. 研究開始当初の背景

2015年に米国 DARPA 主催のロボット競技大会が開催され、国内外の2足歩行ロボットが、危険な災害現場を模したフィールドを闊歩する姿が配信され、全世界に大きなインパクトを与えた。一方で、2足歩行ロボットはコース間の移動に多くの時間を費やしていた。その1つの要因は駆動系の出力の限界である。経産省の「ロボット新戦略」でも、サーボモータの出力が20年間で5倍になったが、次世代のロボット開発には依然として十分でないことが指摘されている。本研究では、ロボットの2足歩行の技術的なボトルネックはモータの出力ではなく、歩行において無駄なエネルギーを消費する脚部の多関節構造にあるのではないかと考えた。

ロボットが歩行する上で無駄なエネルギーは、ロボットにかかる重力を多関節の脚部で支えることで消費されるエネルギーである。このような無駄な力を機械的に補償することで歩行に必要なエネルギーを少なくできる。例えば、身体を前進させる運動をするように、2足歩行ロボットの脚の関節を機械的に拘束する。するとロボットを加速させる力以外の、体重を支える力を含む無駄な力は、機械的な拘束力によって補償される。一方で、2足歩行ロボットの脚は体重を支えるのみでなく、次の1歩のため脚を前に振り出すことも必要である。この際には前述の拘束が、この運動の邪魔をしてはならない。このような複雑な機械的拘束と拘束の切り替えは、通常の機械要素での実現が簡単ではない。

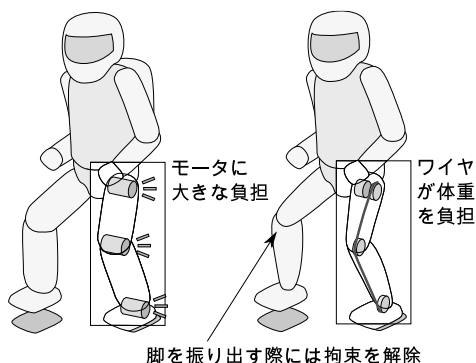


図1 提案する歩行機構のイメージ

2. 研究の目的

本研究では、上記のような機構を、図1に示すような、ワイヤを用いた拘束機構を開発することで実現を目指した。ワイヤを用いた拘束機構は、ワイヤが柔軟性を持つことから、非常にコンパクトでありながら、適用範囲が広く、また、通常の剛体を用いた機械要素とは異なった特性をもつ拘束機構を実現できる。一方で、ワイヤを用いた拘束機構の研究は少ない。そこで本研究では、上述の歩行機構を実現するため、以下のようなワイヤを用いた拘束機構の開発をおこなった。

(1) ワイヤは関節をまたいで取り付けることで、関節の間の運動を拘束することができる。ワイヤは通常、押すと緩んでしまうため、

引張方向にしか力を発生させない。この性質を逆手に取り、状況に応じて上手くワイヤを緩ませ、拘束する多関節系の運動を切り替えることで、ロボットの2足歩行における、体重を支えるフェーズと、脚を振り出すフェーズで異なる拘束を実現できる。これの実現のためには、このように拘束を必要に応じて切り替える機構が必要である。これには、大きな負荷が加わってもワイヤを支えることができ、大きな負荷がかかっても拘束を解除できるような、ワイヤのロック機構が必要である。このような機構の開発を1つの目的とした。

(2) ロボットの体重をワイヤの拘束力によって補償しながら歩くには、歩行の際に重心が、地面に対し水平に近い軌道をとるよう、上手く運動を拘束する必要がある。これには、任意の目標軌道に対し、拘束に必要なワイヤの配置やワイヤが接する部分の形状を求める手法が必要である。この設計方法を提案するとともに、歩行に必要なワイヤの配置とワイヤが接する部分の形状を導出することが、もう1つの目的であった。

3. 研究の方法

上記の目的に対し、以下の方法で研究をおこなった。

(1) 平ベルトを用いたロック機構の開発

自在に機械要素の運動を静止させ、さらには、必要に応じて機構の作用を解除し、運動を再開させる機構をロック機構と呼ぶ。ロック機構には、摩擦を用いた機構が多い。一方で、ワイヤのような移動距離の大きな機械要素をロックするには、通常のロック機構を用いることが難しい。そこで本研究では、ワイヤの先を平ベルトに固定し、平ベルトを剛体に接触させ、平ベルトと剛体間の摩擦を用いて平ベルト動きをロックする機構を開発した。このときに、どのような構造が大きな摩擦を発生させ、大きな負荷に耐えることができるのか、また、大きな負荷のもとで可能な限り少ない力でロックを解除するには、どのような機構が必要かを解析的に求めた。

(2) 非円形プーリの設計法と、歩行のフェーズに合わせたワイヤの配置と非円形プーリの設計

上記のように、歩行のフェーズに合わせて、任意の関節の軌道をワイヤの拘束により実現する必要がある。このときに、重要なのが、どの関節間をワイヤで拘束するか、また、ワイヤがどのように関節の周りを通るかである。後者に関しては、関節周りでワイヤが接触する剛体の形状を決定する必要があり、このような剛体を本研究では非円形プーリと呼ぶ。通常のワイヤ駆動機構では、円形のプーリ、つまり滑車を介してワイヤを配置するが、本研究のような拘束機構を考える場合、この形状が非円形なものとなる。このような非円形プーリの設計は、これまでに前例がな

い。そこで本研究では、与えられた関節間の相対的な運動に対して、これを実現する非円形プーリの形状を解析的に求める方法の提案をおこなった。

また、上述のように、歩行ロボットが脚部で体重を支えながら前進するフェーズ（立脚期）と歩行ロボットが脚部を前方に降り出すフェーズ（遊脚期）には、ことなる拘束機構が必要である。それぞれに必要なワイヤ拘束機構を求めるためには、はじめにそれぞれの運動に必要な関節の軌道を求めたうえで、これらの軌道を機械的拘束で実現するワイヤ拘束機構の設計、つまりは、非円形プーリの設計が必要である。これに関しては、上記の非円形プーリの設計法をこの問題に適用し、立脚期、遊脚期に必要な非円形プーリの形状を求めた。さらには、先のロック機構を用いた拘束の切り替えを用いずに、立脚期と遊脚期を切り替えることが可能かを、それぞれの拘束が幾何学的に干渉しないような非円形プーリの形状を求めることで検証した。

4. 研究成果

(1) 平ベルトを用いたロック機構の開発

一般的に、平ベルトやロープなどを固定する際には、図2(a)のような、キャプスタン機構という機構が用いられる。キャプスタン機構は、平ベルトと円筒との間の摩擦によって平ベルトの運動をロックする。摩擦力によってキャプスタン機構で静止させることのできる張力は、Eulerのベルト理論から求め、平ベルトと円筒の接触角度に合わせて指数関数的に減少するものの、理論上、零になることはない。完全に平ベルトを固定するには接触角を大きくとるか、摩擦係数を大きくする必要はある。また、一度ロックしてしまくと再びロックを解除することが容易ではない。

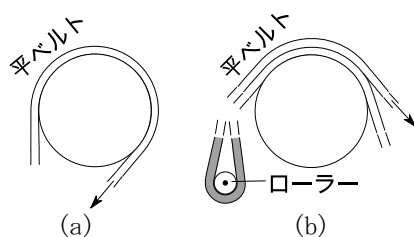


図2 (a)従来のキャプスタン機構、(b)提案した平ベルトを二重に接触させた機構

これに対して本研究では、図2(b)に示すような、平ベルトを一度折り返したうえで、円筒に接触させる機構を提案した。これまでに、このような構造で発生する張力を求めた例がなかったことから、Eulerのベルト理論を拡張した新たな解析方法を提案した。また、この解析により、平ベルトと円筒との接触角度と、摩擦係数が一定の条件を満たせば、理論上、どのように大きな負荷がかかったとしても、平ベルトが動くことはないことを示し、従来のキャプスタン機構の持つ課題の1つを解決した機構であることを示した。

また、もう一方の課題であるロックの解除に関しては、図3に示す機構で平ベルトと円筒の接触角度を変化させることでロックを解除する手法を提案した。通常、平ベルトに大きな負荷がかかっている場合には、この平ベルトがこの負荷に拮抗しながら動いてしまうと、ロックの解除時に大きな力が必要になる。これに対して、上記の機構は、平ベルト自体は動くことなく、平ベルトの接触角度のみを変化させることが可能である。これによって、平ベルトに加わる負荷の大きさに関わらず、非常に小さな力でロックの解除が可能となった。

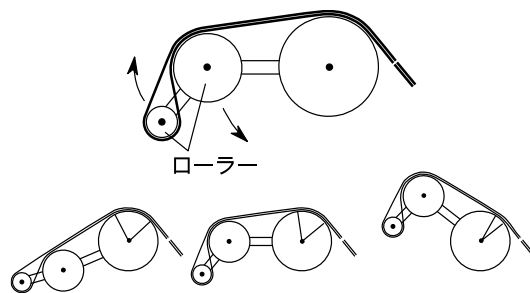


図3 接触角度を変化させる機構

実際に、これらを組み合わせた機構を試作し、図4のように負荷の加わった状況でも、平ベルトのロック状態を切り替えることが可能であることを示した。このロック機構にワイヤを接続することで、歩行ロボットの脚機構におけるワイヤ拘束機構を、大きな負荷のかかる立脚期であっても、切り替えることが可能となった。

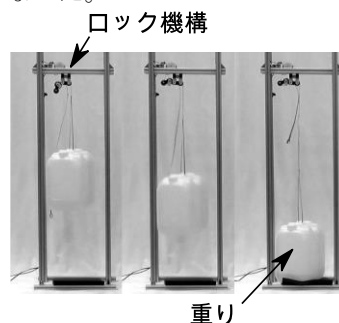


図4 平ベルトに負荷がかかった状態でのロック機構の解除

(2) 非円形プーリの設計法と、歩行のフェーズに合わせたワイヤの配置と非円形プーリの設計

非伸縮なワイヤを用いて関節間の運動を拘束することを考えた場合、ワイヤがどのような経路を通過して両端のリンクへと接続されるかが重要となる(図5)。連続的な関節の運動を考える場合、このワイヤが接触する部分の形状は非円形な曲線となり、これを非円形プーリと呼ぶ。

このような非円形プーリとワイヤによる拘束機構では、実用上の観点から、ワイヤが非円形プーリ上でスライドしないことが望ましい。さらに、このような非円形プーリの形状を求めるには、この条件に加え、ワイ

ワイヤが伸縮しないという条件や、関節の連動の変化が連続的であるという条件を考慮する必要がある。本研究では、これらを考慮し、非円形プーリの形状を解析的に求める方法を世界で初めて提案した。また、提案した解析法によって求まる形状には、不定パラメータがあり、これを非円形プーリの大きさが小さくなるように最適化で調整する手法に関しても提案した。これにより、パラレルリンク機構や歯車機構のような、従来の拘束機構に比べて、小型な拘束機構を実現できるようになった。実際の設計の例として、図6に示すように、上体の重量を支えながら前進するような機構を設計し、提案手法の妥当性も示した。

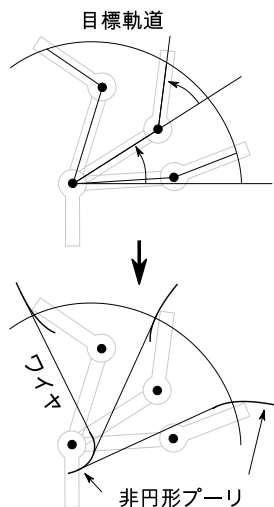


図5 非円形プーリの設計の例

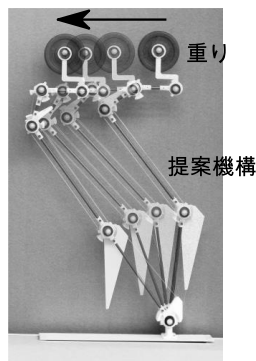


図6 重りにかかる重力を拘束機構で支えながら前進する機構

さらに、前述のように、ワイヤを用いた拘束機構は、ワイヤが1方向の力のみしか発生させることのできない性質を利用して、拘束をうまく切り替えることが可能である。これにより、ロボットが歩行する際に必要な、遊脚期と立脚期の軌道を、それぞれ非円形プーリとワイヤの拘束機構で機械的に実現し、さらには、前述のロック機構を用いて、ワイヤの緩んだ、または、張った状態を切り替えることで、これらの拘束を切り替え、効率的な歩行が可能になる。つまり、遊脚期には、脚の荷重を拘束機構によって支えながら脚を

振り出し、立脚期には、上体の荷重を拘束機構によって支え前進するような脚機構である。一方で、前述のロック機構を使わなくとも、設計を工夫することで、幾何学的に遊脚期と立脚期の拘束を切り替えることができる可能性がある。これには、遊脚期と立脚期のワイヤ拘束が互いに干渉しないことが必要である。このような機構を導出するため、複数のワイヤ拘束機構が同一のロボットに用いられた場合に、これらの拘束が干渉しない条件を導出した。さらに、図7のように、遊脚期と立脚期の脚の軌道を設計したうえで、実際に遊脚期と立脚期で、それぞれのワイヤの拘束機構が干渉しない、非円形プーリの設計をおこなった。結果として、図8のような非円形プーリの形状が得られ、このように、幾何学的な条件を用いることでも、拘束の切り替えが可能であることが示された。

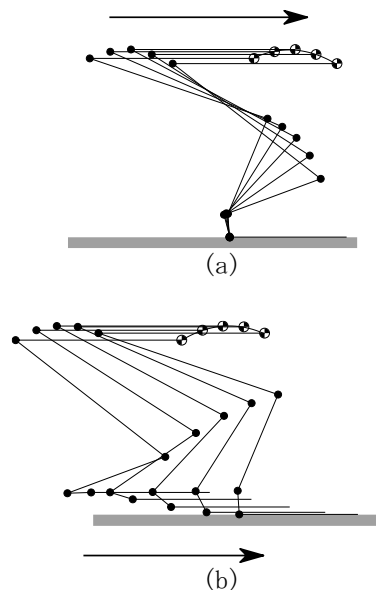


図7 立脚期と遊脚期における脚の軌道

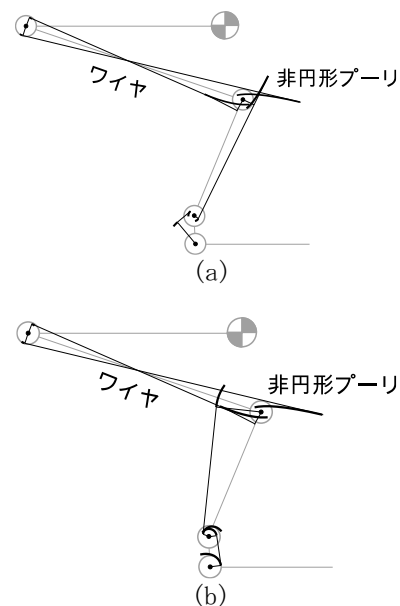


図8 立脚期と遊脚期の非円形プーリの形状

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Shouhei Shirafuji, Shuhei Ikemoto, and Koh Hosoda: “Designing Non-circular Pulleys to Realize Target Motion between Two Joints,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.22 no.1, pp.487-497, 2016. (査読あり)
- ② Shouhei Shirafuji, Naotaka Matsui, and Jun Ota: “Novel frictional-locking-mechanism for a flat belt: Theory, mechanism, and validation,” Mechanism and Machine Theory, Elsevier Science B.V., vol.116, pp.371-382, 2017. (査読あり)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Naotaka Matsui, Shouhei Shirafuji, and Jun Ota: “Locking Mechanism using an Overlapped Flat Belt and Ultrasonic Vibration,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Qingdao, China, pp.461-466, December, 2016. (査読あり)
- ② 白藤 翔平, 太田 順: ”非円形プーリとワイヤを用いたロボット脚機構の設計,” ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, pp.1P2-H11(1)-1P2-H11(3), 福島, 2017年5月.
- ③ 白藤 翔平, 松井 尚孝, 太田 順: ”摩擦を利用した平ベルトロック機構の開発,” ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, pp.2P1-009(1)-2P1-009(3), 福島, 2017年5月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白藤 翔平 (SHIRAFUJI SHOUHEI)
東京大学・人工物工学研究センター・特任
研究員
研究者番号: 80779330

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし