

跳躍ロボットの速比最適化と非円形歯車による実現

○竹田裕史 岡田昌史 (東京工業大学)

1. はじめに

モータの出力パワーは出力トルクと角速度の積で表されるため、パワーを一定とするとトルクと角速度はトレードオフの関係にある。モータ出力に減速機を設け、その速比を G とすると、摩擦による損失がなければ、トルクは $1/G$ 倍、角速度は G 倍となるため、要求される運動に応じて適切な速比を選択する必要がある。

ここで跳躍ロボットについて考えると、ロボットが高い跳躍を行うためには大きな床反力が必要であり、駆動系には小さな速比が要求される。一方で、離陸時の胴体の速度を大きくするためには、速比は大きい方が望ましい。そのため、モータの出力を最大限に利用し、ロボットをより高く跳躍させるには運動の途中で速比を変化させることが有効である。

ロボットに高い跳躍を行わせるために、Kovac ら [1] はカムを用いてばねを収縮、開放させることにより高い跳躍を行う小型ロボットを開発し、新山ら [2] は多自由度の跳躍ロボットに空気圧アクチュエータを導入し、高い跳躍と安定した着地を実現した。これらのロボットは、蓄えたエネルギーを瞬間的に開放することに主眼があり、モータの出力の最大限の利用にはなりにくい。

これらに対し、本研究では運動の途中で速比を変化させることによりモータの出力を最大限に発揮させ、跳躍高さを大きくすることを目的とする。速比を変化させる機構として、自動車などに用いられている CVT (Continuously Variable Transmission) が知られているが、これは出力が高速多回転する運動に適している [3] ため、跳躍ロボットへの適応は難しい。また、広瀬ら [4] はリードねじとばねで構成された負荷感応型無段階変速機を設計し、高木ら [5] はばねとリンクで構成されたロボットハンドのための負荷感応型無段階変速機を設計した。これらは外力に対し速比が変化するもので、運動に応じた速比の設計をすることは難しい。

これに対し、著者らはこれまでに非円形歯車を用いて跳躍ロボットの速比を最適化する手法の提案を行ってきた [6]。これは、静力学に基づいて床反力を最大化するための速比を導出し、シミュレーションを用いて動力学的要素を取り入れた速比の変化を求め、さらに、この結果から所望の速比を実現する非円形歯車の設計を行うものである。これまでに、シミュレーションにより、非円形歯車を用いることでロボットの跳躍高さが大きくなることを示した。そこで本研究では、跳躍ロボットを設計・試作し、提案手法に基づいて非円形歯車を総合する。非円形歯車をロボットへ導入する研究はこれまでもなされてきた。松田ら [7] は非円形歯車と弾性要素を用い、ロボットの可変剛性を実現した。Mundo ら [8] は 5 節リンクの 2 つの入力節に対し非円形歯車によって拘束を与え、出力点が指定した軌道を通るように設計を行った。これらは主に運動学に基づ

いた非円形歯車の設計であるのに対し、本研究は動力学的観点から設計を行うものである。

2. 最適速比の変化と非円形歯車の設計法

2.1 跳躍ロボットのモデル

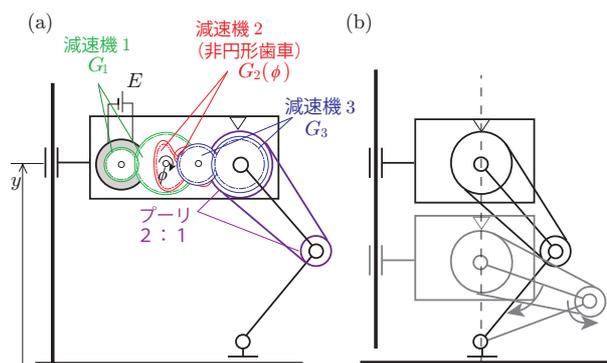


図1 非円形歯車を組み込んだ跳躍ロボットのモデル

ロボットの跳躍高さを大きくする非円形歯車を設計するために、図 1(a) のような跳躍ロボットを考える。このロボットは、一定電圧 E が施されたモータの出力を 3 つの減速機を介し脚部に伝え跳躍を行う。減速機 2 は最適な速比を実現する非円形歯車で、速比 $G_2(\phi)$ は非円形歯車の入力角 ϕ により変化する。減速機 1 にはロボットが大きなトルクを得るために小さな速比 G_1 を持たせる。また、脚の回転角は最大で 90° であるので、非円形歯車の速比の変化領域を引き伸ばし有効に活用するために速比 G_3 の減速機 3 を設ける。脚は 2 本のリンクから成り、その長さとはともに l で、下の脚はベルトを介し胴体と接続されている。胴体と下の脚のプーリ直径比は $2:1$ であり、図 1(b) のように下の脚のプーリが胴体のに対して自転しながら公転する。これにより上下の脚と水平線がなす角 θ_1, θ_2 に

$$\theta_1 + \theta_2 = \pi \quad (1)$$

の拘束を与える。ロボットの胴体はリニアガイドにより鉛直 y 方向の運動に拘束される。また、モータへ入力できる電流には上限 i_{lim} を設ける。

2.2 床反力を最大化する速比の導出

大きな跳躍を行うためには、大きな加速を長時間行うことが必要である。そこで、筆者ら [6] はロボットの床反力に着目し、これを最大化させる速比を求め、それを実現する非円形歯車のピッチ曲線を求め方を示している。ある状態における床反力 F と脚を駆動するトルク τ には仮想仕事の原理より、

$$F = \frac{\tau}{2G_1G_2G_3l \cos \theta_1} \quad (2)$$

が成り立つ。モータの出力トルクはトルク定数 K_t と電流値 i の積

$$\tau = K_t i \quad (3)$$

で表され、モータに与える電圧 E に関して、

$$E = Ri + K_t \dot{\phi} \quad (4)$$

が成り立つ。 R はモータの抵抗値で、逆起電力定数は K_t と等しいことが知られている。なお、ここではモータのインダクタンスは十分に小さいとして無視した。式 (3)、式 (4) およびモータ角速度 $\dot{\phi}$ と胴体の速度 \dot{y} の関係式、

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{y}}{2G_1 G_2 G_3 \ell \cos \theta_1} \quad (5)$$

を式 (2) に代入して、

$$F = \frac{K_t}{2G_1 G_2 G_3 R \ell \cos \theta_1} \left(E - \frac{K_t \dot{y}}{2G_1 G_2 G_3 \ell \cos \theta_1} \right) \quad (6)$$

が得られる。式 (6) は、 $\dot{y} > 0$ のとき $1/G_2$ に関する上に凸の二次関数であるため、 F を最大化する G_2 が、

$$G_2 = \frac{K_t \dot{y}}{E G_1 G_3 \ell \cos \theta_1} \quad (7)$$

と求まる。

2.3 シミュレーションによるピッチカーブ設計

一般に非円形歯車の設計では、一周したときのピッチ曲線や回転角の連続性を考慮する必要がある [9]。本研究で対象にする跳躍ロボットでは、運動に応じて速比を最適設計するので非円形歯車は 360° 以上回転しない。そのため、ピッチ曲線の形状のみに留意して速比の変化を設計することができる。

式 (7) の最適速比はロボットの運動の状態 \dot{y} 、 θ_1 の関数として与えられているが、非円形歯車を設計するには、入力角 ϕ と速比 G_2 の関係を求める必要がある。そこで、図 2 のような手順で順動力学シミュレーションを行う。まず、ロボットの初期姿勢 $\theta_1[0]$ 、 $\phi[0]$ と初期速

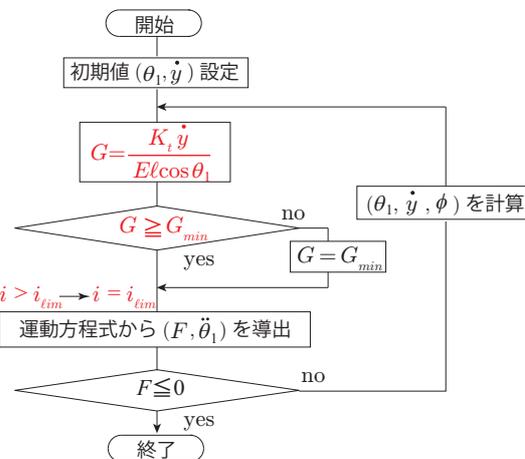


図 2 動力学シミュレーションの手順

度 $\dot{y}[0]$ を与え最適な速比 $G_2[0]$ を求める。ただし、非円

形歯車の速比には制限があるため、速比の下限 G_{2min} を設ける。得られた G_2 に基づいて運動方程式から脚の角加速度、床反力を得る。得られた角加速度から非円形歯車の入力角 ϕ と運動の状態 $\theta_1[1], \phi[1], \dot{y}[1]$ を求め、再度最適速比 $G_2[1]$ を求める。これを床反力が 0 になりロボットが離陸するまで繰り返して行い、 ϕ と G_2 の関係のグラフを得る。

得られた入力角と速比の関係から非円形歯車のピッチ曲線を描く。ある ϕ に対する入力側歯車のピッチ半径 $r_{in}(\phi)$ は歯車の軸間距離を d とすると、

$$r_{in}(\phi) = \frac{G_2(\phi) d}{1 + G_2(\phi)} \quad (8)$$

と表せる。入力 ϕ に対して、出力側の歯車の回転角 ϕ_{out} は、速比の関係

$$\frac{d\phi_{out}}{d\phi} = G_2(\phi) \quad (9)$$

より、

$$\phi_{out} = \int G_2(\phi) d\phi \quad (10)$$

となる。また、そのときのピッチ半径 r_{out} は

$$r_{out} = d - r_{in}(\phi) \quad (11)$$

より求められる。式 (8) により、非円形歯車の入力側のピッチ曲線が求まり、式 (10)、式 (11) から出力側のピッチ曲線が求まる。

ただし、速比の変化が大きい場合、非円形歯車の歯の圧力角が大きくなり、実現が困難となる。特に、跳躍の初期においてはその変化が激しい。そこで、適宜 G_{2min} を調整し、また、得られた ϕ と G_2 の関係をスプライン補完し、実現可能なピッチ曲線を得る。

3. 跳躍ロボットの設計シミュレーション

3.1 機構の設計

シミュレーションによって非円形歯車を設計するために、跳躍ロボットを設計しロボットのパラメータを決定する。図 1 を踏まえ図 3(a) のような跳躍ロボットを設計した。動力の伝達は図 3(c) の上面図のように行われている。減速機 1 は 1/50 のハーモニックギアと増速ベルトで構成されている。減速機 2 の非円形歯車は円形歯車と容易に取り換えられ、実験で比較することができるようにした。減速機 3 は干渉を避けるため、必要のない部分は除去し可動範囲を大きくした。上下の脚の拘束は図 3(b) のようにベルトで行われる。鉛直方向の拘束には摩擦を低減するためニアブッシュを対角線上に配置した。各パラメータを表 1 に示す。モータは MAXON 社の 90WDC モータを使用し、入力電力には安定化電源により制限を与えている。シミュレーションでは、事前に行った実験 [10] を踏まえ、摩擦による損失を考慮した。

3.2 非円形歯車の設計

前節で設計したロボットにおいてシミュレーションを行った。 $G_{2min} = 0.1$ として速比の変化を求めたとこ

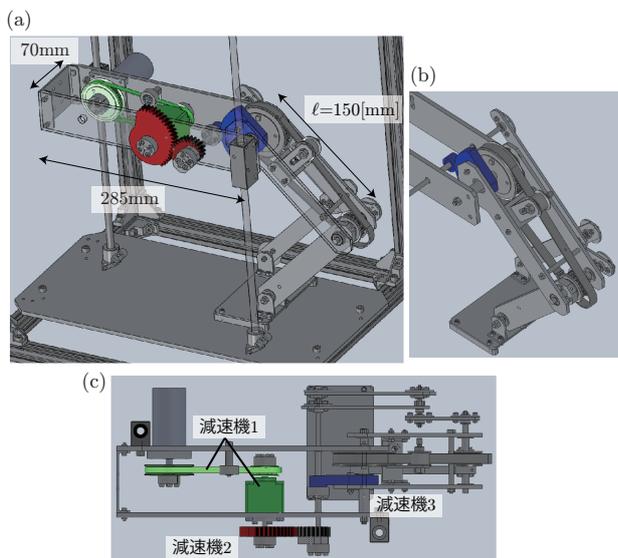


図3 跳躍ロボットの設計

表1 跳躍ロボットのパラメータと初期値

| | |
|---------------------------------|------------|
| G_1 (減速機1の速比) | 1/28 |
| G_3 (減速機3の速比) | 1/5 |
| l (脚長さ) | 0.15m |
| M (総重量) | 2.27kg |
| $\theta_1[0]$ (初期値 θ_1) | 10° |
| i_{lim} (電流制限) | 12A |
| E (入力電圧) | 48V |

る図4の黒色の実線のような速比変化が得られた。この結果より求めたピッチ曲線は図5(a)のようになった。破線部は使用しないため任意の形状である。この非円形歯車は速比の変化が大きくなると急激にピッチ径が変化しており、図6の黒線のようにかみ合い圧力角が大きくなっている。香取[9]はかみ合い圧力角を 50° 以内に収めて設計するように提言しており、この条件では満たされない。そこで、 $G_{2min} = 1$ として再度シミュレーションを行い、さらに曲率を連続にするため、2階微分係数まで連続となるように 10° 毎にスプライン補間したところ、速比は図4の赤線のようになった。このピッチ曲線は図5(b)のように急激な凹部を持たず、圧力角は図6の赤線のように 50° 以内に収まり、実現可能な形状となった。製作された非円形歯車を図7に示す。この非円形歯車のモジュールは1.5で、軸間距離は56mm、厚さは10mm、材質はSKD11とした。

3.3 跳躍シミュレーションによる検証

非円形歯車を用いる有効性を検証するために、非円形歯車の代わりに、一定速比の円形歯車を用いる場合の跳躍とシミュレーションで比較する。跳躍高さは胴体の到達高さと足を伸ばしたときの胴体の高さの差と定義する。一定速比のうち、最も高い跳躍を行ったのは $G_2 = 3$ のときであった。これと $G_{2min} = 0.1$ の場合と、実際に製作した非円形歯車を用いた場合の離陸するまでの速度を比較した結果、図8のようになった。製作した非円形歯車では、 $t = 0.1$ 付近までは $G_{2min} = 1$

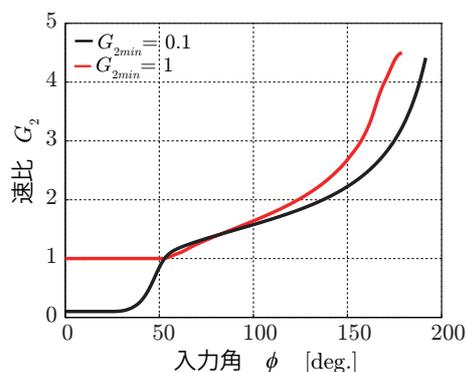


図4 非円形歯車の速比

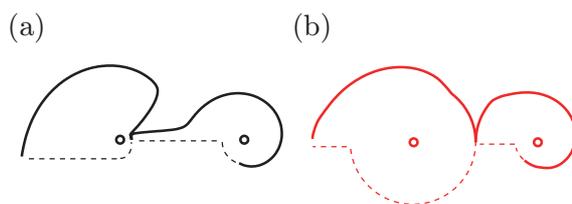


図5 設計した非円形歯車のピッチ曲線

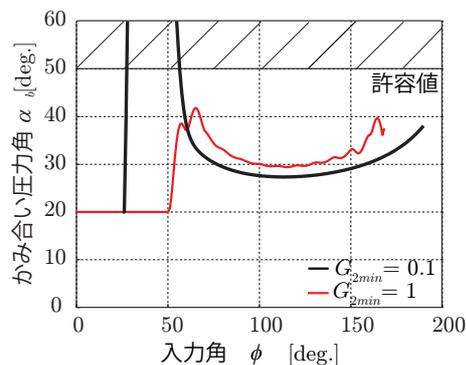


図6 非円形歯車のかみ合い圧力角

の制約のため、円形歯車と同様の動きを示すが、その後、速比の変化に伴い大きく加速し、 $G_{2min} = 0.1$ の理想的な速比と同様の跳躍速度まで到達している。理想的な速比、製作された非円形歯車、円形歯車を用いた場合の跳躍高さはそれぞれ0.120m、0.108m、0.046mとなった。理想的な速比を用いた場合に比べ、製作した非円形歯車の跳躍高さは小さいが、円形歯車に比べ約2.3倍の跳躍高さとなり、非円形歯車を用いることが有効であるとわかった。



図7 試作した非円形歯車

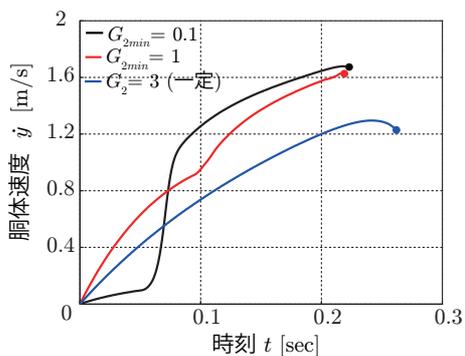


図8 跳躍シミュレーション

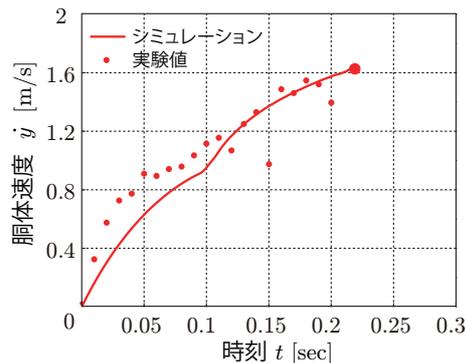


図10 非円形歯車を用いた場合の跳躍実験とシミュレーションの比較

4. 実験による検証

跳躍ロボットを製作し、実験を行った。非円形歯車と速比3の円形歯車を用いた時の実験の様子を図9に示す。非円形歯車を用いた場合、跳躍高さは0.135mとなり、円形歯車を用いた場合の0.089mに比べ1.5倍の跳躍高さとなった。この結果から、跳躍ロボットにおいて非円形歯車を用いる有効性が示された。胴体の速度をシミュレーションと比較すると、図10のようになり、想定より大きく加速していることがわかる。シミュレーションより大きく跳躍をした理由として、事前の実験 [10] において推定した損失が大きすぎることが挙げられる。事前の実験では今回の実験に比べ小規模の電源を用いたため、跳躍せず立ち上がるのみに留まり、速度が小さいため損失パラメータを大きく見積もってしまったと考えられる。

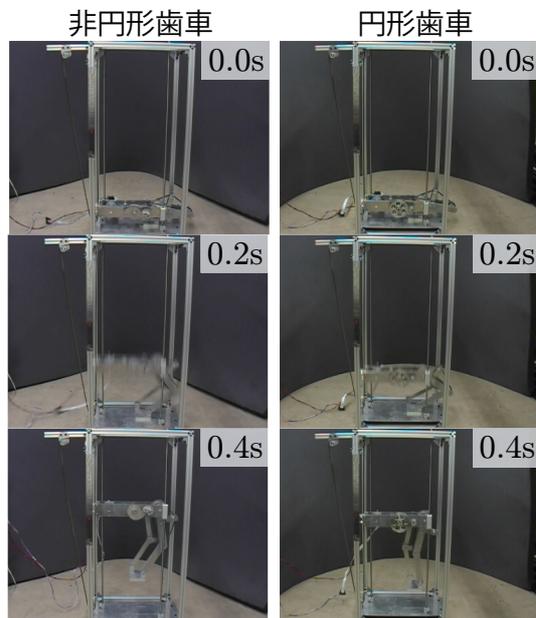


図9 非円形歯車を用いた跳躍ロボットの実験

5. おわりに

本研究では、モータの特性を最大に発揮しロボットの跳躍高さを大きくするために、速比の最適化を行い、非円形歯車を設計した。また、設計した跳躍ロボットを用いて実験を行った。研究により、以下の成果を得られた。

- 床反力を最大化する速比を求め、それを実現する非円形歯車を設計した。
- シミュレーションにより非円形歯車を用いる有効性を示した。
- 非円形歯車を持つ跳躍ロボットを設計・試作した。
- 実験において、非円形歯車を用いた場合、円形歯車を用いた場合に比べ1.5倍高く跳躍を行うことを確認した。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受け行った。また、非円形歯車の製作において、テクファ・ジャパンの香取英雄氏にご助言を頂いた。

参考文献

- [1] M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard, J.C. Zufferey, D. Floreano : "A miniature 7g jumping robot", Proc. of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.19-23, 2008
- [2] 新山, 國吉 : "筋骨格系のバイオメカニクスに基づく跳躍・着地ロボットの開発", 第11回ロボティクス・シンポジウム, pp.50-55, 2006
- [3] 高橋徹 著, "無断変速機の基礎", パワー社, 2002
- [4] 広瀬, C. Tibbettes, 荻原 : "負荷感応型無断変速機 X-screw の開発", 日本機械学会論文集 (C 編), 66 巻 646 号, 2000
- [5] 高木, 小俣 : "ロボットハンドのための負荷感応型無段階変速機", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.2, pp.238-244, 2005
- [6] 岡田, 竹田 : "跳躍ロボットのための非円形歯車による非線形減速比の最適設計", 第29回日本ロボット学会学術講演会論文集, 1E3-3(CD-ROM), 2011
- [7] 松田, 村田 : "非円形歯車を用いた可変剛性関節", 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.3, pp.429-439, 2007
- [8] D. Mundo, G. Gatti, D.B. Dooner : "Combined synthesis of five-bar linkages and non-circular gears for precise path generation", in: 12th IFToMM World Congress, pp.18-21, 2007
- [9] 香取英雄 著, "非円形歯車の設計・製作と応用", 日刊工業新聞社, 2001
- [10] 竹田, 岡田 : "非円形歯車を用いた跳躍ロボットの開発", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2A2-V04, pp.1-4, 2012