

非円形歯車を用いた跳躍ロボットの開発

Development of a Jumping Robot with a Non-Circular Gear

竹田 裕史 (東工大) 正 岡田 昌史 (東工大)

Yushi TAKEDA, Tokyo TECH, takeda.y.ac@m.titech.ac.jp

Masafumi OKADA, Tokyo TECH, okada@mep.titech.ac.jp

For the effective use of motor power, an appropriate gear ratio has to be selected according to the robot task and motion. Because a jumping robot, in particular, requires both high torque and high velocity properties through the motion, a varying gear ratio is necessary. Moreover, it has to be optimally designed and realized. In this paper, we design a jumping robot with a non-circular gear that changes the gear ratio through the motion for the higher jumping. Based on statics, the gear ratio is optimized and change of the gear ratio is obtained by a simulation-based design considering the robot dynamics. A jumping robot is prototyped and a non-circular gear is synthesized. From the experimental results, the energy loss of the experimental system is discussed.

Key Words: non-circular gear, varying gear ratio, jumping robot

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、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させ、蓄えたエネルギーを一気に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、Kikuchi ら [2] は質量の差を利用して車輪をばねで引き上げ段差を乗り越えるロボットを設計した。また、新山ら [3] は多自由度の跳躍ロボットに空気圧を用いる人工筋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、自動車や工作機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 [4] ため、跳躍ロボットへの適応は難しい。また、広瀬ら [5] 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 [6] 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 [7]。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 [8] 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 [9] 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

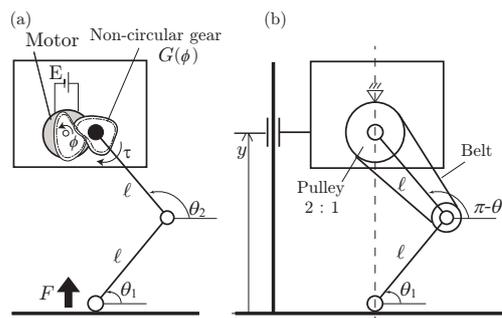


Fig.1 Model of jumping robot with non-circular gear

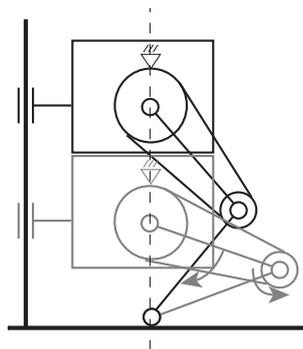


Fig.2 Motion of leg mechanism

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、Fig.1 の (a) ような跳躍ロボットを考える。このロボットは、モータの出力を非円形歯車を介し脚部に伝え、床反力 F により跳躍を行う。非円形歯車の速比 $G(\phi)$ は非円形歯車の入力角 ϕ により変化する。脚は 2 本のリンクから成り、その長さはともに ℓ で、下の脚は Fig.1(b) のように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、Fig.2 のように上の脚が回転すると、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，モータに加える電圧は一定で E とする．

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 [7] 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，

$$F = J^{-1}\tau \quad (2)$$

が成り立つ． J はロボットの脚のヤコビアンで，

$$J = 2l \cos \theta_1 \quad (3)$$

で定義される．また， J を用いて，胴体の速度 \dot{y} と脚の角速度 $\dot{\theta}_1$ は，

$$\dot{y} = J\dot{\theta}_1 \quad (4)$$

を満たす．速比の関係から τ とモータの出力トルク τ_m には，

$$\tau = \frac{\tau_m}{G} \quad (5)$$

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 を用いて，

$$\tau_m = K_t i \quad (6)$$

で表される．逆起電力定数とトルク定数は等しいことから，モータへの入力電圧に関して，

$$E = Ri + K_t \dot{\phi} \quad (7)$$

が成り立つ． R はコイル抵抗値で，モータのインダクタンスは十分小さいとして無視した．また，角速度に関して，

$$\dot{\theta}_1 = G\dot{\phi} \quad (8)$$

が成り立つ．式 (2) に式 (4)-(7) を代入すると，

$$F = \frac{K_t}{2GRl \cos \theta_1} \left(E - \frac{K_t \dot{y}}{2Gl \cos \theta_1} \right) \quad (9)$$

が得られる．式 (9) は， $1/G$ に関する上に凸の二次関数であるため， $\dot{y} > 0$ のとき F を最大化する G が，

$$G = \frac{K_t \dot{y}}{E l \cos \theta_1} \quad (10)$$

と求まる．

2.3 シミュレーションによる非円形歯車のピッチカーブ設計

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 [10]．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 (10) 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 の関係を求める必要がある．そのためにはこれらを ϕ の関数， $\dot{y} = \dot{y}(\phi)$ ， $\theta_1 = \theta_1(\phi)$ として表す必要がある．そこで Fig.3 のような手順で順動力学シミュレーションを行い，非円形歯車の速比変化を求める．まず，ロボットの初期姿勢 $\theta_1[0], \phi[0]$ と初期速度 $\dot{y}[0]$ を与え最適な速比 $G[0]$ 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_{min} を設ける．得られた G 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

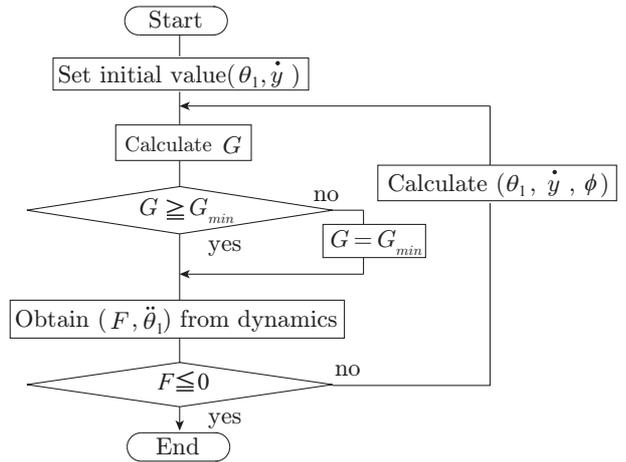


Fig.3 Flow chart of dynamics simulation

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 $G[1]$ 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行い，入力角 ϕ と速比 G 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，

$$r_{in}(\phi) = \frac{G(\phi)d}{1 + G(\phi)} \quad (11)$$

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

$$\frac{d\phi_{out}}{d\phi} = G(\phi) \quad (12)$$

より，

$$\phi_{out} = \int G(\phi) d\phi \quad (13)$$

となる．また，そのときのピッチ半径 r_{out} は

$$r_{out} = d - r_{in}(\phi) \quad (14)$$

より求められる．式 (11) により，非円形歯車の入力側のピッチ曲線が求まり，式 (13)，式 (14) 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_{min} を調整し，また，得られた ϕ と G 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．Fig.1 のモデルにおいて，非円形歯車のみでは十分なトルクを得ることができない．また，この跳躍ロボットの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は，非円形歯車を大きく回転させる必要がある．そこで，Fig.4 のように， G を速比 $G_2(\phi_{in})$ が変化する非円形歯車の他に定数の速比 G_1, G_3 を持つ減速機を設け，

$$G(\phi) = G_1 G_2(\phi_{in}) G_3 \quad (15)$$

とする．これと Fig.1 を踏まえ Fig.5 のような跳躍ロボットを設計した．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。鉛直方向の拘束には摩擦を低減するためリニアブッシュを対角線上に配置した。各パラメータを Table.1 に示す。シミュレーション

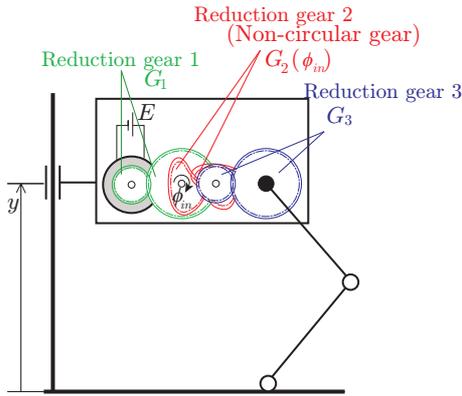


Fig.4 Configuration of gears for jumping robot

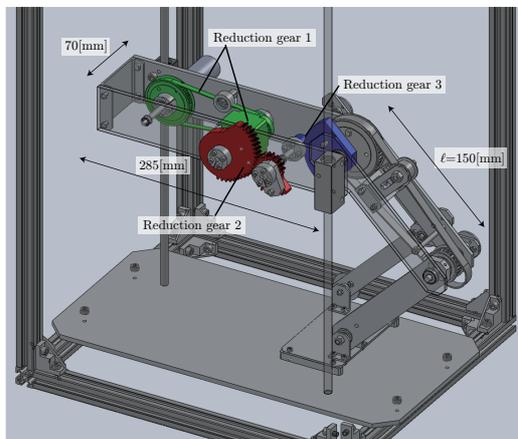


Fig.5 Design of jumping robot

では、減速機 1 の粘性抵抗のみを考慮した。

Table 1 Parameters and initial value of jumping robot

G_1 (Gear ratio of gear 1)	1/28
G_3 (Gear ratio of gear 3)	1/5
l (Leg length)	0.15m
M (Total mass of robot)	2.06kg
$\theta_1[0]$ (Initial value of θ_1)	10°
i_{lim} (Current limit)	6A
E (Applied voltage)	24V

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ろ Fig.6 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 Fig.7(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、かみ合い圧力角が大きくなり実現不可能な形状となっている。そこで、 $G_{2min} = 1$ として再度シミュレーションを行ったところ、 Fig.6 の緑色の実線のようになり、これを基にピッチ曲線を描くと Fig.7(b) のようになった。速比の変化が緩やかになりピッチ径が急激に変化しなくなった。シミュレ

ーションで求めた非円形歯車のピッチ曲線のデータは離散的なものであるが、非円形歯車を製作するには、これを連続関数で表す必要がある。そこで、 $G_{2min} = 1$ の条件のもと、シミュレーションで得られた速比変化を 10° 毎にスプライン補間した。このスプライン補間は、各境界で速比の 2 階微分係数までが連続となるようにしている。また、歯車の修正を容易にするため、各境界における微分係数と 2 階微分係数に任意の値を与えられるように、5 次の多項式で補間した。 Fig.7(b) において、ピッチ曲線が凹になっている部分をとりぞくため、 50° における速比を修正したところ Fig.6 の赤色の実線のようなになった。このピッチ曲線は Fig.7(c) のように凹部が取り除かれ滑らかなピッチ曲線となり、実現可能な形状となったため、このピッチ曲線を持つ非円形歯車を製作する。製作された非円形歯車を Fig.7(d) 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。

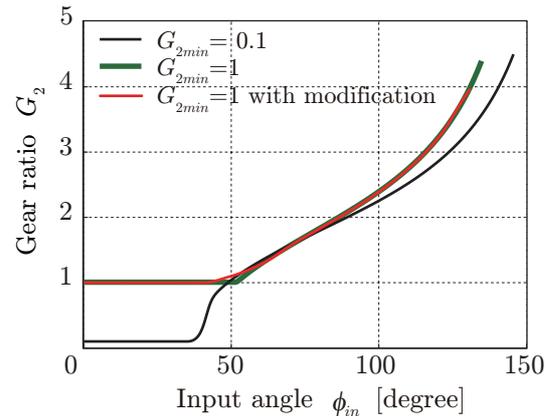


Fig.6 Gear ratio of non-circular gear

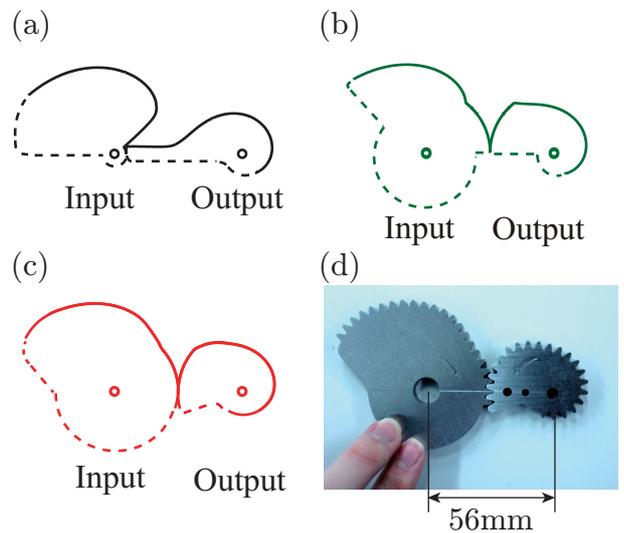


Fig.7 Pitch curve of non-circular gear

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し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、 Fig.10 のようになった。製作した非円形歯車では、 $t = 0.08$ 付近までは $G_{2min} = 1$ 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 0.3184m, 0.2587m, 0.0933m 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 2.8 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。

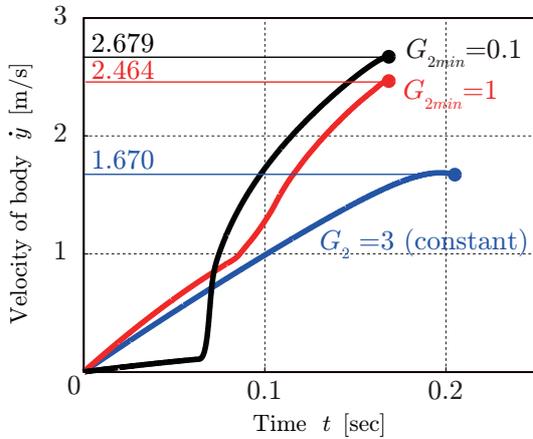


Fig.8 Simulation of jump

4. 実験による検証

跳躍ロボットを製作し、実験を行った。非円形歯車を用いた時の実験の様子を Fig.9 に示す。残念ながら跳躍することはできなかった。非円形歯車の速比は、シミュレーションで求めた運動に応じて設計されるため、摩擦などによる損失のモデルに誤差がある場合、想定された運動と差が生じて速比が最適でなくなる。また、 $G_2 = 3$ の円形歯車で実験を行ったところ、立ち上がらなかった。これらの結果から、非円形歯車を用いることで大きな床反力を

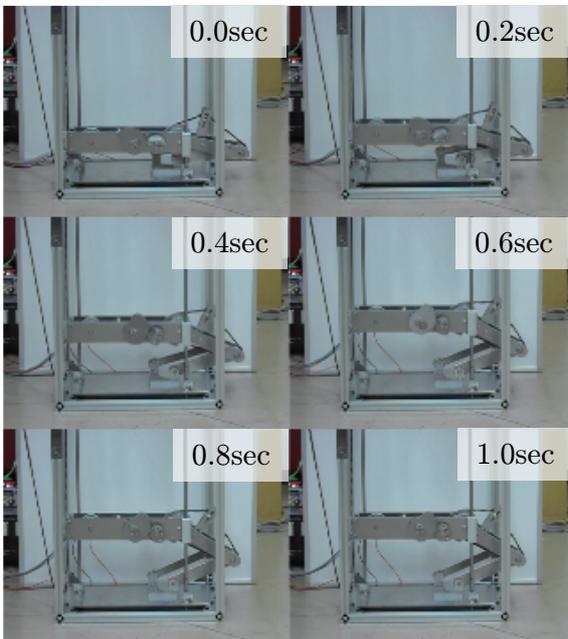


Fig.9 Experiment of jumping robot with non-circular gear

を得られることは分かったが、さらに、ロボットの跳躍を実現するためには、シミュレーションで考慮した減速機 1 の粘性摩擦以外の損失も考慮する必要がある。この損失を求めるために、減速機 1 の粘性摩擦に加え、減速機 1 の伝達効率、リニアブッシュの粘性摩擦をシミュレーションのモデルに加える。まず、速比が $G_2 = 1$ で一定の円形歯車を用いて実験を行った。そのときの速度変化は Fig.10 の青点のようになった。これと一致するように損失のパラ

メータを調整し、シミュレーションを行ったところ Fig.10 の青線のようになった。また、非円形歯車を用いたときの実験の結果は赤の点で示され、調整したパラメータを用いて再度シミュレーションを行ったところ赤の実線のようになり、時間が経過するにつれ失速していることがわかる。ロボットが跳躍するにはこれらの損失も考慮し、非円形歯車を再度設計する必要がある。

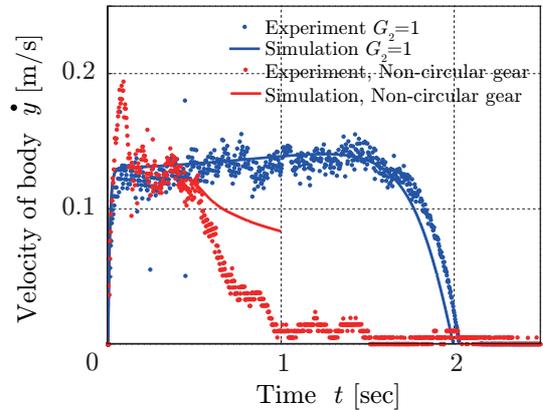


Fig.10 Velocity of jumping robot in experiments and simulation with energy loss model

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。
- 試作したロボットは跳躍までには至らなかったが、一定速比の場合に比べ、大きな床反力を実現することを確認した。

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] K. Kikuchi, K. Sakaguchi, T. Sudo, N. Bushida, Y. Chiba, Y. Asai: "A study on a wheel-based stair-climbing robot with a hopping mechanism", Mechanical Systems and Signal Processing vol.22, Issue.6, pp.1316-1326, 2008
- [3] 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
- [4] 高橋徹 著, "無断変速機の基礎", パワー社, 2002
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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