

プラスチック製小型サイクロ減速機の開発, およびマニピュレータへの応用

Development of cyclo gear reducers made of plastic, and its application to manipulator

○ 湯川 俊浩、箱崎 義英、星 勝博
○ T. Yukawa, Y. Hakozaki, K. Hoshi

岩手大学工学部機械システム工学科
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University

キーワード：サイクロ減速機 (Cyclo Gear Reducer), エピトロコイド歯車 (Epitrochoid Gear),
非磁性マニピュレータ (Nonmagnetic Manipulator)

連絡先：〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5 岩手大学工学部機械システム工学科 湯川 俊浩
TEL:019-621-6403, FAX:019-621-6403, E-mail:yukawat@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

現在, MRIの画像情報に基づいて, 手術支援ロボットを稼働させて手術をおこなう試みがある. MRI装置に組み込む場合には, 装置内が高磁場のため, ロボットを非磁性にする必要がある.

そこで本論文では, 非磁性マニピュレータを開発し, 複数のマニピュレータの協調制御をおこなうことを目的とする. ロボット駆動系の減速機として, プラスチック製のサイクロ減速機を製作する. サイクロ減速機とは, 様々な形状の歯車を用いることができ, かみ合い率が通常のインボリュート歯車よりも約二倍から三倍程高く, 高い減速比を実現することができ, しかも伝達効率が高いことを特徴とする減速機である¹⁾³⁾. サイクロ減速機的主要材料として, ポリアセタール樹脂(POM)を用いる.

今回, このプラスチック歯車を3D加工機を用いて製作する. 試作の段階では, 従来の遊星歯車のインボリュート歯車のように, 細かい歯を樹脂材料⁴⁾で作ることは難しいが, エピトロコイド曲線形状の歯車は, 歯が細くないので, 強度や剛性が低い材料でも歯車や減速機全体を作ることができる.

2. サイクロ減速機

2.1 原理

サイクロ減速機には, 遊星歯車列と平行クランク機構が組み合わされている⁵⁾. この減速機構の歯車の歯形としては, 様々なものを用いることができる. 例えば, エピトロコイド曲線や円弧を組み合わせた曲線などである.

サイクロ減速機内の遊星歯車に用いるエピトロコイド曲線の方程式は, 曲座標により, 曲線の半

径を r , 角度を θ , a をインボリュート歯車でのピッチ円の半径, n を歯数, b/n をモジュールとすると, 次のように表すことができる.

$$r = \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{n}\right)^2} + \frac{2ab}{n} \cos(\theta(n-1)) \quad (1)$$

a, b, c のパラメータの変化による曲線の形状を図1に示す. 本研究ではパラメータを $a=17, b=18, n=18$ とする.

図2(a)は, サイクロ減速機内の遊星歯車列の原理図である. 偏心した遊星歯車Pが静止した内歯太陽歯車Sと噛み合うことで, 太陽歯車の回転軸を中心に高速で公転し, それと同時に低速で自転

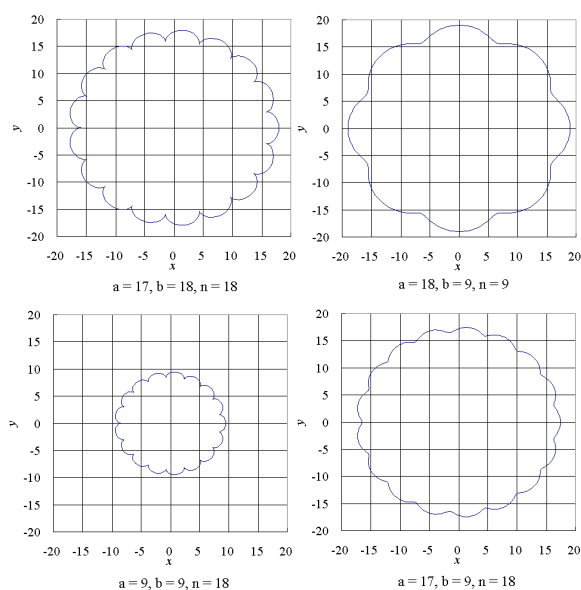


Fig. 1 Epitrochoid curve

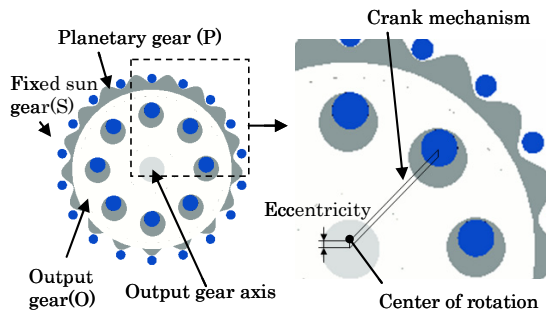
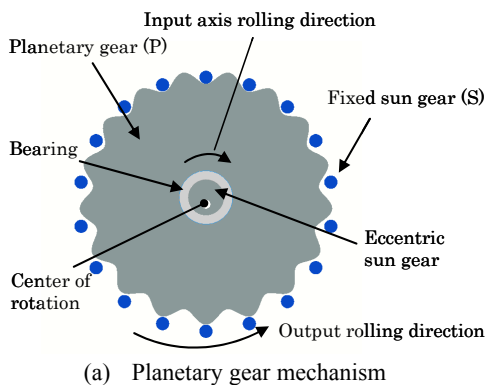


Fig. 2 Mechanism of the cyclo gear reducer

する。このとき、遊星歯車 P と静止した内歯太陽歯車 S の歯数差が小さいほど、大きい減速比が得られる。

図2 (b) の破線で囲んだ部分は、平行クランク機構の原理図である。サイクロ減速機では、遊星歯車 P から出力歯車 O に向かい突き出している出力ピンの中心と、出力歯車 O の開口穴の中心が平行四辺形に相当し、これが偏心距離に相当する。

太陽歯車 S と同一直線上にある出力歯車 O と遊星歯車 P が平行クランク機構となることで、常に同軸上で回転力(トルク)が出力される。そして、図 2 (a), (b) を合わせたものがサイクロ減速機となる。

静止節である太陽歯車 S 及び遊星歯車それぞれ z_a, z_b とし、ピッチ円直径を d_a, d_b とする。原動軸、出力軸の回転数をそれぞれ n_a, n_o とすると、次のように減速比 i を求める関係式が導かれる。

$$\frac{1}{i} = \frac{n_o}{n_a} = \frac{d_a - d_b}{d_b} = \frac{z_a - z_b}{z_b} = \frac{z_d}{z_b} - 1 \quad (2)$$

したがって、 $z_a - z_b$ が小さいときに減速比が大きくなる。

サイクロ減速機を使うメリットとして、インボリュート歯型により設計される通常の歯車による減速機構では噛み合い率が低く、一～二枚であり一つの歯に対する負荷が大きく、滑り接触のため磨耗や破損する可能性が高くなってしまふ。しかし、サイクロ減速機は高い噛み合い率により伝達

力が分散し、かつ転がり接触で歯車が回転するため、歯が破損しにくく、剛性が高くなる。したがって、一段で減速率を高くすることができ、小型にすることが可能である。

2.2 設計 サイクロ減速機に搭載するモーターは RS-385PH (マブチモーター製⁶⁾)である。その仕様を表 1 に示す。モーターの回転速度は

Table 1 Performance list of a motor (RS-385PH)

Voltage range	At maximum efficiency		
	Torque	Velocity	Current
12 ~ 30 V	8.3 mNm	7420 rpm	410 mA

Table 2 Property value of POM

Modulus of longitudinal elasticity	Tensile strength	Density
3.1 ~ 3.6 GPa	60 ~ 65 MPa	1.42 g/cm ³

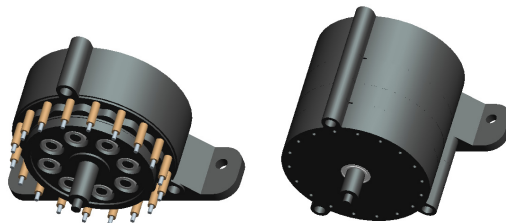


Fig. 3 Cyclo gear reducer designing

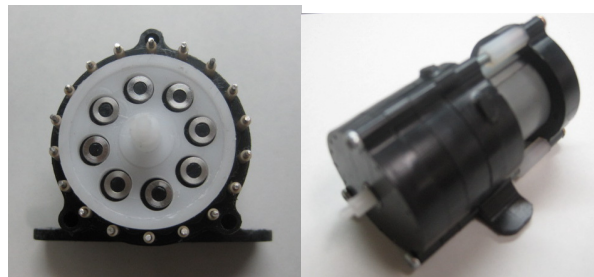


Fig. 4 Cyclo gear reducer

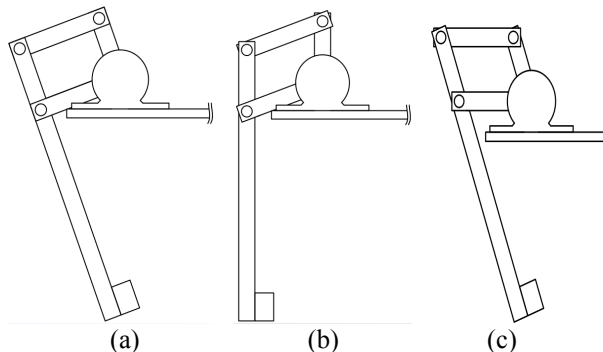


Fig. 5 The movement patterns of the link mechanism

7,420[rpm] である。今回、目標のトルクと回転速度を出力させるために、一段の減速比を17とし、二段ギアとすることで $17^2 = 289$ の減速比を得られるようにした。

太陽歯車と遊星歯車の直径、歯数をそれぞれ d_a [mm], d_b [mm], z_a , z_b とすると、(2)式から $d_a = 18$ [mm], $d_b = 17$ [mm], $z_a = 18$, $z_b = 17$ となる。遊星歯車は、エピトロコイド曲線を用いた形の歯車であり、太陽歯車としては、中心にピンを立て、そこに中空円筒型のスペーサーを入れ、転がり接触とすることで、歯への負担を減らす。図3(a)は一段のサイクロ減速機の構造を示している。この上に同構造の減速機構を加えることで、図3(b)のように二段のサイクロ減速機となる。

2.3 製作 サイクロ減速機を製作するにあたり、3D加工機である MDX-40 (Roland製⁷⁾) および MDX-40 用回転軸ユニット ZCL-40 を用いた。この装置は、汎用工作機械の旋盤やフライス盤を用いると加工しにくく、複雑な三次元形状を製作するのに適している。

3D CADソフトウェアを用いて、サイクロ減速機を設計し、3D加工機で製作した減速機を 図4 (a), (b) に示す。材料はPOMを用いる。ここで、POMを用いる長所は、加工性が良く、軽量であるということである。表2にPOMの材料特性を示す。

3. マニピュレータへの応用

3.1 マニピュレータの設計 マニピュレータの主な材料として、サイクロ減速機と同様に、非磁性のPOMを用いる。マニピュレータの基本構造は、パラレルリンク機構である。パラレルリンク機構は、四つのリンクから成り立っており、一本のリンクを固定し、他のリンクの一つを回転させることで限定連鎖となり、四本のリンクの平行四辺形を形成する機構である。

図5 に、パラレルリンク機構の動作パターンを

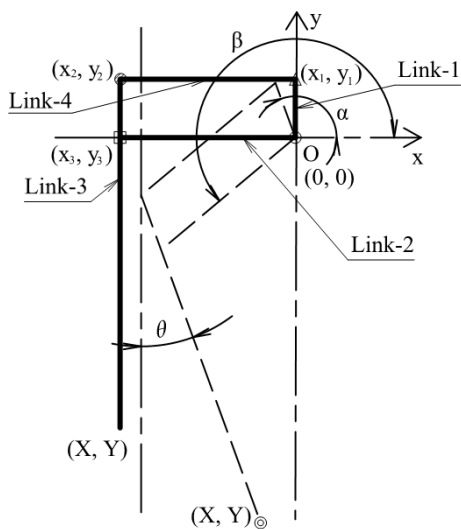
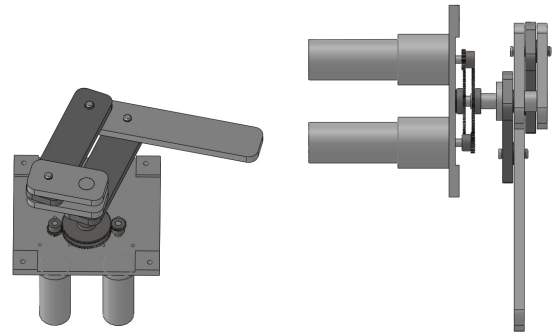


Fig. 6 The geometry of the parallel link mechanism



(a) Front view (b) Side view
Fig. 7 Parallel manipulator designing

示す。脚の中心に対し、対称に配置された二つのモーターにより、図5 (a), (b), (c) に示すようなパラレルリンク機構のパターンを作り出している。二つのモーターのうち、(紙面に対して) 手前のモーターを固定し、もう片方の(奥の)モーターが回転することで、図5 (a)から図5 (b) の形へ動く。

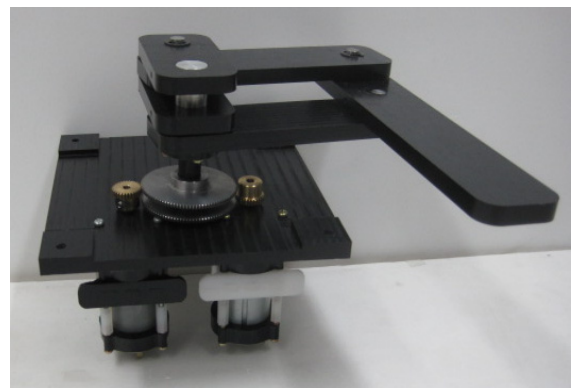


Fig. 8 Parallel manipulator

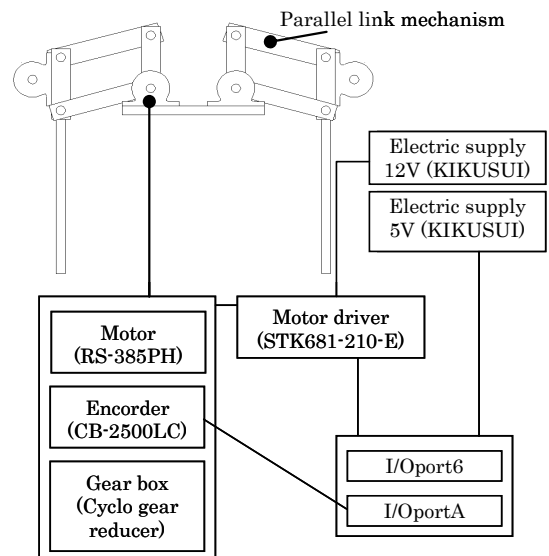


Fig. 9 Cooperative dual-arm system

逆に、奥側のモーターを固定し、手前側のモーターを回転することで、図5(a)から図5(c)の形に動く。また、それぞれのモーターを逆方向に等速で動かすことで、四本のリンクが形作る四角形の形を変えることなく動かすことができる。

3.2 パラレル機構の運動学 つぎに、パラレルリンク機構の運動学を示す。パラレルリンクの機構図を図6に示す。O点を原点とし、図6に示すようにx軸、y軸をとる。リンク1までの回転角度を α 、リンク2までの回転角度を β として、x軸を基準に反時計回りに角度をとる。リンク1、リンク2、リンク3の長さをそれぞれ l_1, l_2, l_3 とする。これらの値から先端座標 (x, y) とリンク3の角度 θ を求める。リンク1とリンク2の先端座標を $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ とすると、回転角度 α, β から

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 \cos \alpha, & y_1 &= l_1 \sin \alpha \\ x_2 &= l_2 \cos \beta, & y_2 &= l_2 \sin \beta \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。リンク1とリンク3をつないでいるリンク4は、両端が自由端であり、角度は α, β から求められるので、リンク4とリンク3の交点の座標 (x_2, y_2) は、(3)式から

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + x_3 = l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta \\ y_2 &= y_1 + y_3 = l_1 \sin \alpha + l_2 \sin \beta \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。したがって、座標点 (x_2, y_2) を通るリンク3の鉛直方向からの角度について、反時計回りを正とすると、角度 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_3}{y_2 - y_3} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{x_1}{y_1} \right) = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (5)$$

となり、 β に依存しないことがわかる。したがって、リンク3の先端座標 (X, Y) は

$$\begin{aligned} X &= l_1 \cos \beta + l_2 \cos \alpha - l_3 \cos \theta \\ &= l_1 \cos \beta + l_2 \cos \alpha - l_3 \sin \alpha \\ Y &= l_1 \sin \beta + l_2 \sin \alpha - l_3 \sin \theta \\ &= l_1 \sin \beta + l_2 \sin \alpha - l_3 \cos \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

となる。この(6)式の先端座標を元に、マニピュレータの制御をおこなう。

3.3 マニピュレータの製作 サイクロ減速機と同様に、3D CADソフトウェアにより、マニピュレータを設計し、3D加工機 MDX-40 を用いて製作した。

3D CADソフトウェア (Solid Works) により設計したマニピュレータを図7に示す。図7(a)は正面図、

図7(b)は側面図である。図7のマニピュレータの写真を図8に示す。

4. 制御系

4.1 H8マイコン マニピュレータを制御するシステムを図9に示す。マニピュレータの制御はH8マイコン(AKI-H8/3052F-秋月電子通商⁸⁾)を用いておこなう。H8マイコンは、高速・高分解能A/D・D/Aコンバータを内蔵しており、エンコーダでのモーター制御に適している。高速RS232ドライバ・レシーバICを使用しており、パソコンや他のマイコンとの通信が可能である。

図10に、H8マイコンと周辺機器の回路図を示す。ロータリーエンコーダからのパルスを受信するI/OポートAで受け、そのパルスのカウントすることで回転数を検出する。この検出された回転数を元に、マニピュレータを位置制御する。

4.2 モータードライバ モータードライバには、STK681-210-E (三洋製、正・逆モータードライバ)を用いる。このモータードライバは、外部からの入力信号で正転・逆転・ブレーキ動作が可能である。H8マイコンのI/Oポート6 (図10(a))から送信された入力信号 (図10(b)中の IN 1, IN 2, 及

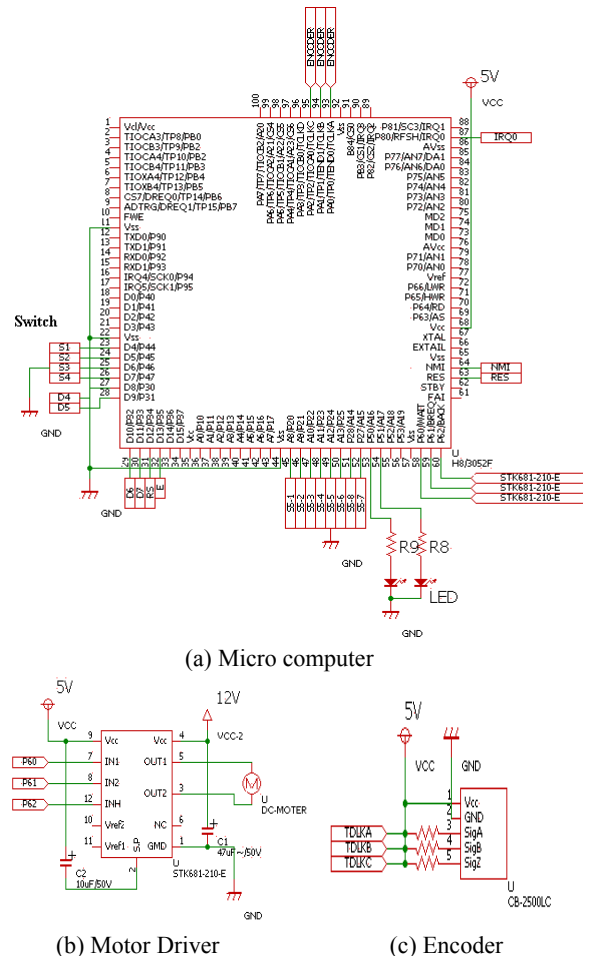


Fig. 10 Electronic circuit diagram

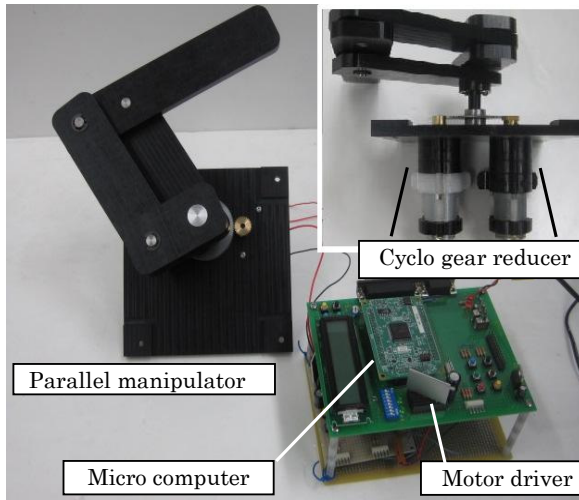


Fig. 11 Manipulator control system

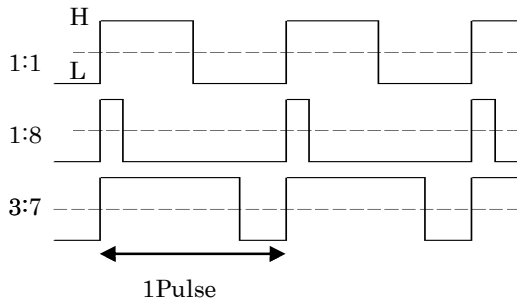


Fig. 12 Pulse width modulation

Table 3 Rotation measurement result

	Motor	First step	Second step
Average of rotation	3213.8 [rpm]	183.2 [rpm]	10.93 [rpm]
Gear reduction ratio	1.0	17.5	294.0

びIN3) の組み合わせによって制御をおこなう。実際に製作したマニピュレータの制御システムの写真を図11に示す。

4.2 PWM制御 モーターの速度制御は、PWM (Pulse Width Modulation) 制御を用いておこなう。図12に示すように、一定周期のパルス信号のHレベルとLレベルのDuty比を変化させて速度制御をおこなう。H8マイコンでは、ITUレジスタのタイマーモードレジスタによりPWM制御をおこなうことができる⁹⁾。

5. 実験

5.1 実験内容 開発したサイクロ減速機の性能評価をおこなう。評価として、モータとギヤの

回転数を調べる。モーター単体、一段ギア、及び二段ギアでの回転数を計測した。ロータリーエンコーダにはCB-2500LC (ライン精機)を用い、パソコンによりカウンタボードを用いて計測した。その結果を表3に示す。

5.2 実験結果 モーターの適正電圧は12~30[V]であるが、エンコーダ計測の都合上、5[V]で回転速度を計測した。実験の結果、モーター単体での回転速度は3213.8[rpm]であった(表3)。

一段ギアでのサイクロ減速機の回転速度を測定した結果、183.2[rpm]となり、減速比は17.5となった。理論値との誤差は2.9[%]であった。

二段ギアでのサイクロ減速機の回転速度を測定したところ、10.93[rpm]であり、減速比は294.0であった。理論値との誤差は1.7[%]であった。

5.3 考察 一段ギアと二段ギアの双方共に、理論値に比べて少ない回転数となった。これは、高い減速比のため、トルクが大きくなり、POM材料の部品にかかる負荷が大きくなり、剛性が弱まり、摩擦によって回転しにくく、滑りにくくなったためと考えられる。

6. 結言

本論文では、サイクロ減速機を3DCADで設計し、3D加工機を用いて製作した。また、サイクロ減速機を用いたマニピュレータを設計、製作した。そして、減速機単体とマニピュレータの動作確認をおこなった。

今後は、マニピュレータの位置制御をおこなう予定である。

参考文献

- 1) Piermaria Davoli, Carlo Gorla, Francesco Rosa, Claudio Longoni, Franco Chiozzi, and Alessandro Samarani, "Theoretical and Experimental Analysis of a Cycloidal Speed Reducer", Proc. of PTG 2007 ASME 2007 10th ASME International Power Transmission and Gearing Conference, DETC2007-34098, Sept. 4-7, 2007, Las Vegas, USA
- 2) Kosse Vladis, "Using Hysteresis Loop and Torsional Shock Loading to Assess Damping and Efficiency of Cyclo drives", 14th Int. Cong. on Sound and Vibration (ICSV14), pp. 9-12 July 2007.
- 3) 住友重機(株)HP, <http://www.shi.co.jp/>
- 4) 加藤 康司, 前川 一郎, 小野 陽, 朝倉書店(1989) 167-181
- 5) 小川 潔, 加藤 功, 機構学, 森北出版株式会社 (1971)161-169
- 6) マブチモータ(株)HP, <http://www.mabuchi-motor.co.jp/>
- 7) Roland DG HP, <http://www.rolanddg.co.jp/>
- 8) 秋月電子通商HP, <http://akizukidenshi.com/>
- 9) 横山直隆, 片岡巖,C言語によるH8マイコンプログラミング入門(2003)