

機関番号：15401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ~ 2010

課題番号：21760200

研究課題名 (和文) 構造体により動力伝達できる振動駆動型負荷感応無段変速機

研究課題名 (英文) Load-sensitive continuously variable transmission driven by vibration of structure

研究代表者

高木 健 (TAKAKI TAKESHI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80452605

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、振動により動力を伝達でき環境の負荷に応じて減速比が自動的に変わる無段変速機 (CVT) を開発した。本 CVT は動力を振動によって機械の構造体によって伝達することができるため、歯車、シャフト、プーリー、ベルトなどの動力伝達機構は必要としない。また、シンプルかつ小型である。内視鏡外科機器のような小さい機器にも実装できる直径 5 mm、長さ 15 mm の超小型の CVT を開発した。実験により鉗子を駆動できることを確認した。

研究成果の概要 (英文)：

This paper proposes a load-sensitive continuously variable transmission (CVT) driven by vibration. Its reduction ratio change automatically in response to the load. The CVT can transmit a power through a structure of machine and needs not a drive mechanism such as gear, shaft, pulley and belt. It is compact and simple. We have developed a remarkably small CVT and its size is 5mm in diameter and 15mm in length. It can install in an endoscopic surgical instruments. We experimentally verified that the CVT can drive a forceps.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：ロボットの機構

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：動力電圧、無段変速機、負荷感応、振動、摩擦伝達、機構、ねじ、小型軽量

1. 研究開始当初の背景

近年、内視鏡外科機器に代表されるように、狭い空間で細く小さな機器を用いて作業する研究が盛んに行われている。作業をするためには、当然これらの機器に動力を伝達する必要がある。しかし、細く小さい機器に動力

を伝達することは容易ではなく、動力を伝達できる範囲は広くない。よって、このような機器を発展させるには、革新的な動力伝達方法を確立する必要がある。

また、一般に動力伝達機構には次の2つのことが要求される。

- (1) 動力を適切な位置に伝達すること
- (2) 動力を適切な力・速度に変換して出力すること

従来手法では(1)の要求に対し、シャフト、歯車、ワイヤなどの動力を伝達する機構を用いている。また、要求される位置の近くにアクチュエータを配置し長い配線を用いる方法もある。

次に、上記(2)の要求について述べる。力と速度は減速比においてトレードオフの関係にある。ゆえに、適切な力と速度を得るためには、任意の減速比に変えられる無段変速機（以下、CVT）が理想的である。自動車用のCVTは実用に至っており、これよりも小型軽量のCVTもHirose[1]や萩原[2]らにより報告されている。しかし、これらは狭い空間で作業する機器には複雑で大きい。

そこで、新たな動力伝達方法として動力を振動により伝達でき、環境の負荷に応じて減速比が自動的に変わるCVTを開発する。

[1] S. Hirose et al: Development of X-screw: A Load-Sensitive Actuator Incorporating a Variable Transmission, Proc. ICRA, pp.193-199, 1999.

[2] 萩原ら：回転型負荷感応無段変速機の開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '01 講演論文集，1A1-M2，2001.

2. 研究の目的

本研究ではアクチュエータの動力を振動により伝達でき、環境の負荷に応じて減速比が自動的に変わるCVTを開発する。実験により支配的な要素を明らかにし、接触面での現象を考慮した動力学モデルを構築する。そして、理論の体系化を図るとともに、最適な設計方法を導く。これにより内視鏡外科機器のような小さい機器にも応用できる、超小型軽量のCVTを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

実験プラットフォームを整え、本CVTの動力伝達部における物理現象を実験的に検証する。また、内視鏡外科器具である鉗子に実装できる超小型軽量のCVTを開発する。本CVTがさまざまな位置・姿勢にあっても動力を伝達できることが望ましい。この要求を満たすために、振動発生装置をボールジョイントにより任意の姿勢に固定できる構造体を開発する。内視鏡外科器具である鉗子に本CVTを実装し、実験によりさまざまな位置・姿勢においても本CVTを駆動できることを確認する。具体的な内容を下記に示す。

(A) 実験プラットフォームを構築することにより、提案するCVTの評価および検証

- 1) 振幅が約数十 μm の振動に影響を与えずに非接触で 10kHz 以上のサンプリングができるレーザー変位計 (KEYENCE LK-G35) を用いることで、提案機構の振動を計測できる実験プラットフォームを構築する。
- 2) μm オーダーのねじの偏心量を計測する。
- 3) 本 CVT に負荷を加えることで、減速比が変化することを検証する。

(B) ねじの接触面における支配的な現象の解明および材料に求められる性質の検証

- 1) 構築した環境において、ねじには M16 の 30 度台形ねじを用い、雄ねじの材料には炭素鋼 (S45C, 表面処理: 四三酸化鉄皮膜)、雌ねじの材料にはポリアセタールおよび青銅 (CAC406C) を用いて検証する。
- 2) ねじの接触面において動力伝達をする上で必要とされる性質を検証するために、材料の組合せや、潤滑剤などについて検証する。

(C) 振動発生装置の開発

- 1) 本 CVT を駆動するための振動発生装置として、圧電アクチュエータとしては大きな振幅を得られるバイモルフ型のものを用いて開発し動作検証する。
- 2) (C-1)にて製作した振動発生装置では振幅が小さいく十分な振幅を得ることが難しかったため、モータ (Maxon 社製, ブラシレスモータ, EC10) に偏心した錘を付けて振動させる振動発生装置を開発し動作検証する。

(D) 3次元空間において振動を伝達できる構造体の開発

- 1) 3次元空間において動力を伝達する要求を、当初は(C-1)の方法をパラレルリンク機構に適応し満たす予定であったが、(C-2)のように振動を発生させる方法に変更したため、振動発生装置をボールジョイントにより任意の姿勢に固定できる構造体を開発することで、3次元空間において振動を伝達する。
- 2) (D-1)と同様にボールジョイントを用いることにより、本CVTを任意の姿勢に固定できるようにし、動作検証を行う。

(E) 内視鏡外科器具である鉗子に実装できる超小型軽量のCVTの開発

- 1) 直径 5mm, 長さ 15 mm の超小型の CVT を開発する。

- 2) 内視鏡外科器具である鉗子を改造し、(E-1)で開発した CVT を実装する。
- 3) (D)で開発した構造体を用いて、(E-2)の本 CVT を実装した鉗子をさまざまな位置・姿勢で駆動できることを確認する。

4. 研究成果

研究成果を3章の研究の方法に対応させて述べる。

(A)について

製作した実験プラットフォームの構成図を図1に示す。DAボードから、モータの回転速度と回転方向を制御する為の制御電圧がモーターアンプに送られる。モータに付けられたエンコーダーにより、カウンタボードを用いてモータの回転数を計測する。偏心量の計測には、レーザー変位計を用いる。レーザー変位計には、コントローラが接続されており、これにより、計測周期を一定に保ちつつ計測データを蓄積することができる。蓄積したデータはオフラインでPCに取り込む。また、これら実験装置を構成している部品の詳細を表1に示す。

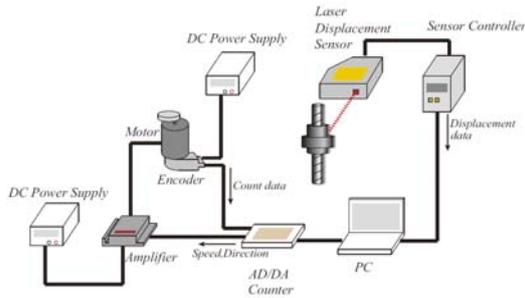


図1：実験装置の構成図

表1 実験装置の構成部品

品目	メーカー	型番
モーター	maxon	ブラシレスモーター (EC40) 118806
モーターアンプ	maxon	DEC 50/5
エンコーダ	maxon	エンコーダ HEDS 5540 110515
レーザー変位計	KEYENCE	LK-G30
レーザー変位計コントローラ	KEYENCE	LK-G3000V
AD/DA Counter CardBus	Interface	CSI-360116
雄ねじ	ミスミ	30度台形ねじ片側付タイプ・MTSBR16-200-S20-Q10-MQ3
雌ねじ	ミスミ	30度台形ねじ用ナット・樹脂タイプ・MTSFJR16

製作した実験装置を図2に示す。実験装置は上層、中層、下層に分かれている。上層部には、モータ、雌ねじ、レーザー変位計が固定されている。上層と中層は板ばねによって連結されており、上層は中層に対し x 軸方向にのみ振動することができる。同様に中層部は下層部と連結されており、下層部に対し y 軸方向にのみ振動する。これにより上層部は下層部に対し、x 軸、y 軸両方向に振動することができる。

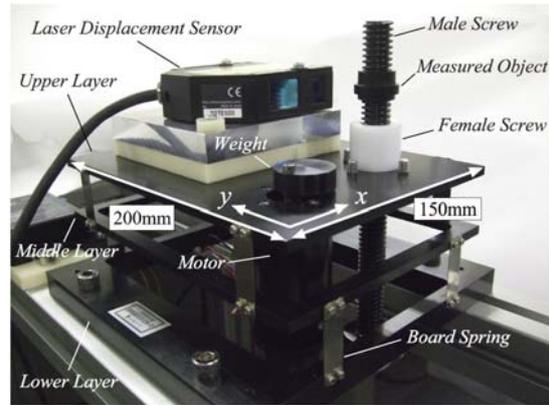


図2：製作した実験装置

モータは maxon 社製のブラシレスモータを使用した。モータに重り(約 18.7[g])を付け回転させることで、振動を発生させた。また、モータは約 6000[rpm]で回転させた。雄ねじには図3に示す M16 の台形ねじ(約 270[g])を使用した。雄ねじの下端には、負荷として重りを引っ掛けるためのフックがあり、またそれには雄ねじの回転を抑制しないようベアリングが取り付けられている。

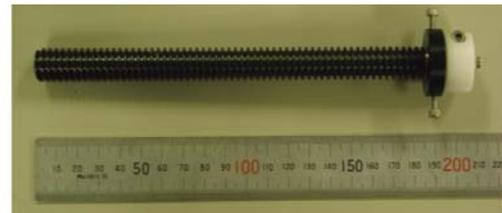


図3：雄ねじと負荷を加えるためのフック

偏心量を計測するための治具を図4に示す。この治具を雄ねじに固定する。治具には、5mm幅で高さ2mmの段差があり、これをレーザー変位計により監視する。レーザー変位計コントローラ付属の計測ソフト[LK-Navigator]を利用してコントローラの設定を行い、計測周期を0.0001[s]とした。計測周期を一定に保っているため、実験データを解析することで、レーザーが段差を乗り越える間の時間を求めることで、雄ねじの速度を算出することができる。また、雄ねじがレーザー変位計に最も接近している時と、レーザー変位計から最も離れている時の計測値の差から、偏心量を求めることができる。また、この模式図を図5に示す。

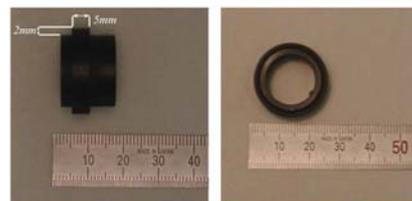


図4：偏心量を計測するための治具

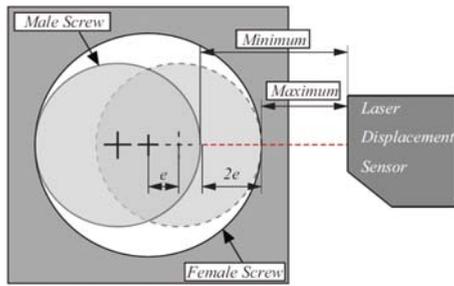


図 5：偏心率の計測方法の模式図

実験では、負荷を加えた雄ねじを振動により駆動させ、この負荷を持ち上げる際の偏心率を計測する。雄ねじに加える負荷として、水を入れたペットボトルを利用する。負荷を加えない場合から 0.5kg ごとに 5.0kg まで負荷を増加させ、偏心率の変化を調べた。図 6 は 5.0kg の負荷を加えたときの実験の様子である。それぞれの負荷について 10 回実験を行い、その平均より偏心率を求めた。その実験結果を図 7 に示す。負荷が増加すると偏心率が小さくなっていることが分かる。

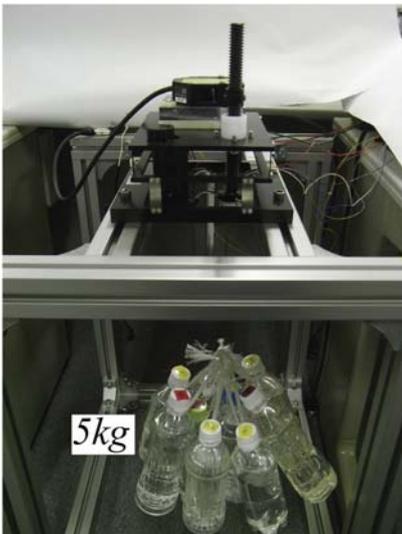


図 6：実験の様子（負荷 5kg）

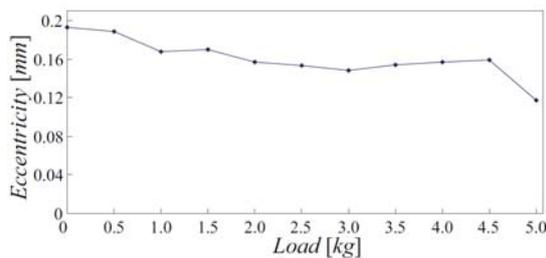


図 7：偏心率と負荷の実験結果

ここで、この偏心率より減速比を求めた結果を図 8 に示す。負荷が大きくなるにつれて減速比が増加していることを示しており提

案機構が負荷に応じて変速しているため、負荷感応無段変速機として機能していることが分かる。

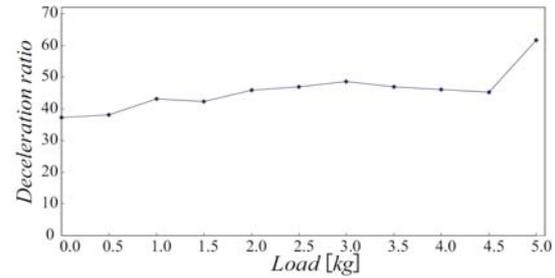


図 8 減速比と負荷の実験結果

本 CVT は、偏心率の変化に伴って変速する。その為、負荷が大きくなるにつれ偏心率が減少し、変速して雄ねじの速度は遅くなる。その様子を図 9 に示す。負荷の増大に従い、雄ねじの速度が遅くなっていることが分かる。

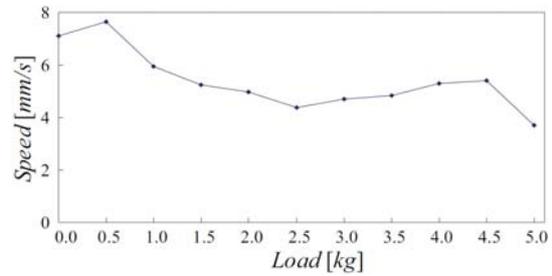


図 9：速度と負荷の実験結果

また、実験の全試行における偏心率と速度の関係を表すと、図 10 のようになる。偏心率が増加するにしたがって速度も増加していることが分かる。

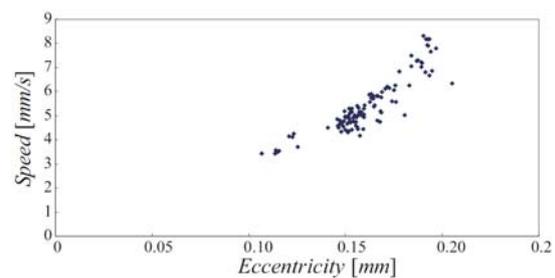


図 10：速度と偏心率の実験結果

偏心率および振動した回数より、雄ねじの理論的な移動量を求めることができる。ここでは、実験によって求めた偏心率と振動した回数から、雄ねじの理論的な移動量を算出し、理論値と実際の雄ねじの移動量との比較を行う。実験では、レーザーが幅 5mm の段差を乗り越える間の偏心率を計測している為、実際の雄ねじの移動量は 5mm とした。

各負荷での結果を図 11 に示す。低負荷で

は、実際の移動量 5mm と理論値が近く、負荷の増加にともなって、誤差が大きくなっており、実際には理論値ほど雄ねじが駆動されていないことが分かる。雄ねじと雌ねじの間に生じる跳ねや滑りなどが、理論値どおりに雄ねじが駆動しない原因と考えられる。

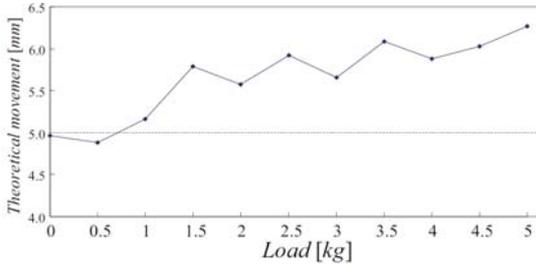


図 11: 速度と偏心量の実験結果

(B)について

雄ねじが雌ねじ内で跳ねることなどにより、動力伝達が断続的になる不具合が懸念されていた。そこで、雄ねじの材料として炭素鋼 (S45C, 表面処理: 四三酸化鉄皮膜)、雌ねじの材料にはポリアセタールおよび青銅 (CAC406C) を用いて検証した。青銅よりもポリアセタールの方がこの問題を緩和できることが分かった。また、特に接触面は油などが付着していない乾いた状態の方が良好に駆動できたため、クーロン摩擦が本 CVT において重要な役割を担っていると考えられる。

(C)について

圧電アクチュエータとしては大きな振幅を得られるパイモラフ型のもを用いて開発した振動発生装置を図 12 に示す。この振動発生装置では M2 のねじを用いた CVT を駆動することに成功している。

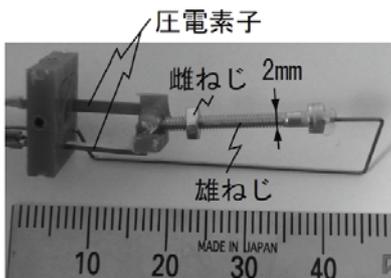


図 12: 圧電素子を用いた振動発生装置と M2 のねじを用いた超小型 CVT

しかし、大きな振幅を得ることが難しかったため、モータに錘を取り付けて振動させる方法を用いることにした。この方法にて振動を発生させる振動発生装置を図 13 に示す。

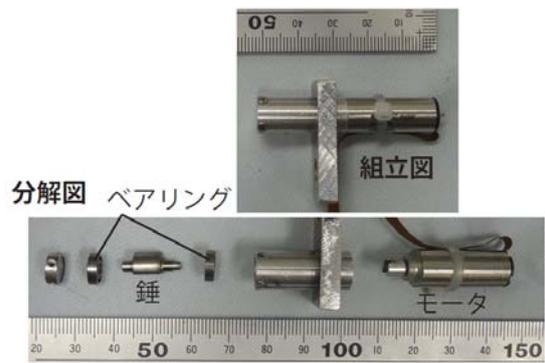


図 13: モータを用いた振動発生装置

(D)について

任意の姿勢に固定できるボールジョイントを用いて 3 次元空間に動力を伝達できる製作した構造体を図 14 に示す。また、この図には、(C) で述べた振動発生装置と (E) で詳細を述べる内視鏡器具である鉗子を駆動する小型 CVT も示されている。



図 14: 3 次元空間に動力を伝達できる構造体

(E)について

製作した直径 5 mm、長さ 15 mm の超小型の CVT と、それを実装した鉗子を図 15 に示す。鉗子は実際に内視鏡外科器具として使用されているものを改造して使用した。ねじは M2 を用いており、雄ねじは鉗子のシャフトを加工して製作した。また、雌ねじは黄銅を用いた。(A) で述べた本 CVT は雄ねじが回転するが、この超小型 CVT は鉗子のシャフトを回転させることが困難であったため雌ねじが回転する。



図 15: 鉗子に実装した超小型 CVT

(D) で述べた、3 次元空間に動力を伝達できる製作した構造体にこの鉗子を様々な姿勢

に固定して、(C)で述べたモータを用いた振動発生装置を用いて、駆動できるかを検証した。さまざまな姿勢でも駆動できることを確認した。異なる姿勢で駆動できていることを図 16, 17 に示す。これまでの動力伝達機構では、細い棒の先端にさまざまな角度で取り付けた機器に動力を伝達することは困難であったが、本 CVT を用いることにより、動力を伝達できることを確認した。

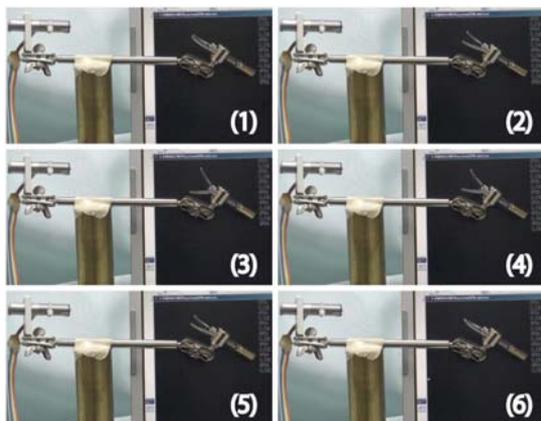


図 16：本 CVT を実装した鉗子をさまざまな姿勢で駆動 (1)

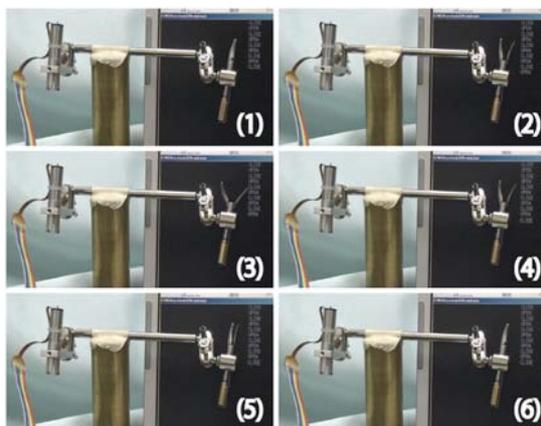


図 17：本 CVT を実装した鉗子をさまざまな姿勢で駆動 (2)

実機を製作し、当初の目標であった、動力を振動により伝達でき環境の負荷に応じて減速比が自動的に変わる無段変速機 (CVT) を開発すること、これまで動力を伝達することが困難であったところへも振動を用いることにより動力伝達を可能にすること、および、内視鏡外科機器のような小さい機器にも実装できる超小型軽量の CVT を開発することを達成することができた。しかし、接触面での現象を考慮した動力学モデルの構築や、理論の体系化を図るとともに、最適な設計方法を導くなどの理論的な所には改良の余地がある。現在も Open Dynamics Engine を用いてシミュレーションを行い理論の構築を進め

ているが、これらについては今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

高木 健, 振動により駆動する負荷感応型無段変速機, ケミカルエンジニアリング, 査読なし, Vol. 56, No. 1, pp. 1-4, 2011.

〔学会発表〕 (計 1 件)

高木 健, 振動により駆動する負荷感応変速機, JST 広島大学 新技術説明会, 2009 年 5 月 14 日, 東京.

〔その他〕

ホームページ等

http://www.robotics.hiroshima-u.ac.jp/hyper_human_manipulation/screw.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 健 (TAKAKI TAKESHI)
 広島大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号：80452605

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし