

## 閉リンク機構を用いた変速機構の機械式制御 Mechanical control of transmission mechanism with closed link mechanism

- 湯川 俊浩\*, 加賀 亨\*\*, 武田 洋一\*\*, 江刺家 哲朗\*\*, 金子 昌晴\*\*, 大島 修三\*\*\*  
○ T. Yukawa\*, T. Kaga\*\*, Y. Takeda\*\*, T. Esashika\*\*, M. Kaneko\*\*, S. Ohshima\*\*\*

\*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

\*\*岩手大学工学系技術室, \*\*\*岩手大学地域連携推進機構

\*\*Division of Technical Support, \*\*\*Center for Regional Collaboration in Research and Education, Iwate University

**Key words** : 無段変速機 (Continuously Variable Transmission), 四節リンク機構 (Quadric Crank Chain),  
てこ・クランク機構 (Lever-Crank Mechanism), カム (Cam),  
仮想仕事の原理 (Principle of Virtual Work)

連絡先: 〒020-8551 盛岡市上田4-3-5 岩手大学工学部機械システム工学科

TEL: 019-621-6403, FAX: 019-621-6403, E-mail: yukawat@iwate-u.ac.jp

### 1. 緒言

パラレルマニピュレータは、複数のリンクで構成される閉リンク機構からなり、軽量、高精度、高剛性等の特長をもつ。パラレルマニピュレータに関する従来の研究として、内山らは、パラレルロボット HEXA を開発し、機構の開発や制御の特性等について様々な研究をおこなってきた<sup>1),2)</sup>。パラレル機構、すなわち閉リンク機構の最も簡単な例は、四つのリンクを回り対偶によって結合した四節リンク機構や、滑り対偶によって直線上を往復するリンクと回り対偶によって結合されたリンクからなるスライダークランク機構が平面内で動作する場合である。

本研究では、これらの閉リンク機構を利用して、新たに変速機構を提案する。変速機構は大別して無段変速と有段変速に分けられるが、ここでは無段変速に限定して論述する。無段変速機 (CVT) は有段変速機に比べて連続的で滑らかな変速ができ、実数の入出力比を制御できることを特長とする。CVT は伝達機構内でエネルギー損失が少ないと考えられている。現在、自動車にはベルト式 CVT 等が搭載されているが、これらの CVT は動力伝達のしくみが根本的に摩擦伝動によるものであるため、動力伝達部品間に張力や圧力をかけるために別の油圧機構等の付加的な装置が必要である。そのため、加えられた入力 (トルク) が減速比に応じた出力 (トルク) となっていない。これは、力学的には入出力間で仮想仕事の原理が成り立っていないことを意味する。つまり、伝達装置そのものを起動するための初期トルクが必要となる。また、機構部品の磨耗や劣化等に起因する回転部の滑りによる伝達ロス、または伝動部品が回転する際に音が生じるといった現象があった。さらには、トライボロジー分野の解析も必要となってくる。このような理由から、従来の CVT は高出力の動力伝達が難しいという課題があった。

そこで本論文では、従来の摩擦伝動方式を用いる

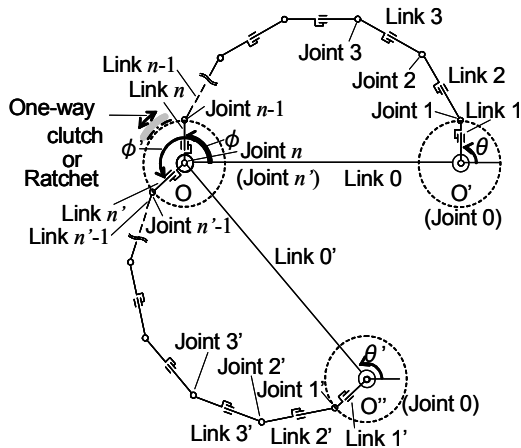
ことなく、四つのリンクを回り対偶によって結合させた閉リンク機構を有し、四つのリンクのうち、一つ以上のリンクが滑り対偶によって一直線上に並べた二組のリンクで結合されている CVT について提案する。数年前から著者らは、この CVT の回り対偶の一つにラチェットやワンウェイクラッチ等の非可逆的な滑り対偶を回転軸上で重ねた複合型無段変速機を開発してきた。(このリンクを用いた複合型無段変速機を L-CVT と呼ぶことにする)。回転せずに固定されたリンク (ボティ) と回り対偶をなし、かつ完全に回転するリンクを入力軸とし、ここから回転エネルギーの一部を使って他のリンク上で滑り対偶をなす二組のリンクを動作させるためのエネルギーへ変換することにより、四つのまわり対偶の内、二つの回り対偶において、固定リンクに対する二つのリンクの相対的な回転数比を片方向の回転区間内で一定保持する機構を無段変速機としてここで定義する。この無段変速機の基本形は、四節リンク機構や、その一つであるてこ・クランク機構である<sup>3)-5)</sup>。本論文では、すべり対偶を完全機械的に動作させるためにカムを用いる。つぎに、その平板カムの形状の設計について述べる。

### 2. 閉リンク機構を用いた複合伝達型 CVT の構造

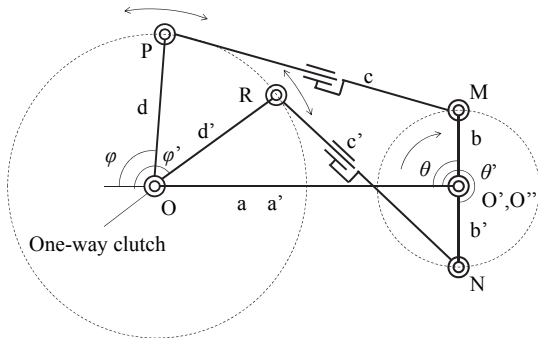
一般的に、 $n$  本のリンクを用いて、まわり対偶と滑り対偶が交互に縦列配置された閉リンク機構を図 1(a) に示す。これは、入力軸  $O'$  と出力軸  $O$  の回転数の比を連続的に変化させる機構である。関節は冗長自由度をもっており、各々の回り対偶にはアクチュエータが必要である。このリンクシステムは今後、変速機、減速機だけでなくロボット等も含め、様々な分野で応用が期待される。

今回、提案する L-CVT の二つの基本構造を図 1 (b), (c) に示す。どちらの L-CVT も、二つの四節リンク機構  $abcd$ ,  $a'b'c'd'$  によって構成される。図 1

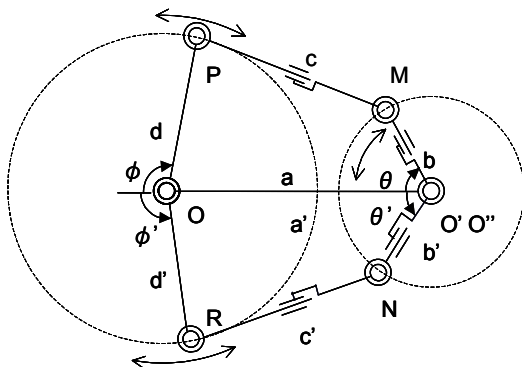
(b) は、二つの四節リンク機構が並列に配置され、運動面が平行になる場合である。図 1 (c) は、二つの四節リンク機構が同一平面上で対称に配置されて動作する場合である。入力軸は  $O'$  ( $O''$ ) で同軸上にある。出力軸は  $O$  である。図 1 (b), (c) のどちらの四節リンク機構も、四つのリンク、および各リンクをつなぐ回り対偶によって構成されている。四つのリンクのそれぞれを固定リンク (ベース), クランク (入力リンク), 連結リンク, 出力リンク (てこ) とよぶ。固定リンク ( $a, a'$ ) は本体 (土台) に



(a) The general structure of combined-type CVT with  $n$ -links



(b) The CVT in which two identical quadric crank chains are set parallel to each other



(c) Symmetrical arrangement of a couple of quadric crank chains

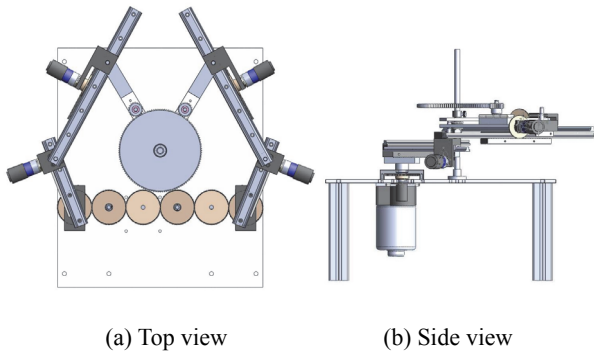
Fig. 1 Several fundamental structures of the L-CVT

固定されている。四節リンク機構は、リンク長さの関係により、てこ・クランク機構、平行クランク機構、両てこ機構、スライダークランク機構等に分けられる。これらの中で、現在のところ、L-CVT に適用できるのは、てこ・クランク機構とスライダークランク機構と我々は考えている。ここでは、てこ・クランク機構を用いる。各リンクがてこ・クランク機構の長さ条件<sup>4), 5)</sup>を満足すれば、最も短いリンク ( $b, b'$ ) がクランク (入力リンク) として回転し、連結リンク ( $c, c'$ ) がクランクから動力を出力リンクのてこ ( $d, d'$ ) へ伝達し、出力リンクのてこ ( $d, d'$ ) が揺動する。最終的に、往復運動する揺動の一方のみの運動エネルギーを回り対偶である  $P, R$  または回転軸  $O$  に取り付けられたワンウェイクラッチやラチェットを介して出力軸を回転させる。

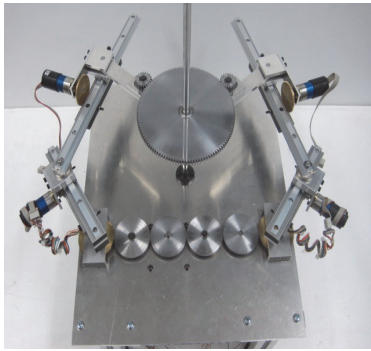
四つのリンクのいずれかを伸縮させることで無段変速が可能になるが、その方法として、i) 揺動する出力リンク ( $d, d'$ ) のみを伸縮させる構造<sup>3)</sup>や、ii) 回転する入力リンク ( $b, b'$ ) と連結リンク ( $c, c'$ ) を伸縮させる構造<sup>4), 5)</sup>の、二つの方法を今までに提案してきた。構造 i) は、図 1(b) のように並列に四節リンクを設置している。(図 1(b) では、出力リンク ( $d, d'$ ) の伸縮の記号 (スライダー) は入っていない)。構造 ii) は図 1(c) のように対称に四節リンクを設置している。これらの二つの構造 i), ii) は共に、出力リンク ( $d, d'$ ) の揺動を、一方のみにワンウェイクラッチを介して間欠的に出力するが、この間欠的に伝わる出力軸の回転運動を連続的な回転運動に変えるため、てこ・クランク機構の数を構造 i) では四組<sup>3)</sup>、構造 ii) では二組<sup>4), 5)</sup>の複数組を搭載し、入力回転の位相を遅らせることで連続的な出力軸の回転を実現した。構造 i), ii) 共に、組数を増やすならば、リンクの伸縮が無制御のときには、出力の回転運動と入力回転運動の関係には、減速比率を考慮した分で比較すると相関が高まる。ただし、入力トルクは組数の分だけ分散されて、出力軸で再び合力となって伝わる。構造 i) は出力リンク ( $d, d'$ ) のみ伸縮させるので、出力の回転運動は入力軸が一定速度の回転の場合でも速度むらが生じる。この現象が四節リンクの運動が早戻り運動に起因するからである。構造 ii) は、連結リンク ( $c, c'$ ) の長さを連続的に変化させることによって、出力リンク  $d$  の揺動角度や角速度が変化するので、揺動を一定の角速度に制御して速度むらをなくすことができ、かつ入力リンク ( $b, b'$ ) の長さを変化させることで連続的に無段変速が実現できる。

### 3. 複合伝達型 CVT の基礎試験機

L-CVT の試作機を図 2 ((a) 上面図, (b) 側面図, (c) 写真) に示す。この L-CVT は、図 1 (c) に示すように、クランク (図 1,  $b, b'$ ) と連結リンク (図 1,  $c, c'$ ) の伸縮用としてエンコーダ付 DC モータが四つ搭載されている。これらのモータは定電圧の PWM 信号で速度制御され、H ブリッジ回路が内蔵されたモータドライバを用いて正転、逆転、停止、電磁ブレーキの動作をする。エンコーダで回転数を制御して、リンクの伸縮制御が可能となる。本体底



(a) Top view (b) Side view



(c) Photograph of L-CVT model

Fig. 2 Prototype of L-CVT

部に取り付けられた一台の入力用 DC モータ (図 2 (b)) により、一列に並んだ六個の平歯車 (図 2 (a)) を介して、両端の歯車の回転軸がクランクの入力軸と同軸であるため、二つのクランクはそれぞれ逆方向に回転して、二組の四節リンクが対称の早戻り動作をする。ワンウェイクラッチは、出力リンク上に一つずつ取り付けられて一つの出力歯車と接している。ワンウェイクラッチの駆動方向 (CW, CCW) は同じ方向に合わせて取り付けられている。これによって、出力歯車 (図 2, 一つの大歯車) が一方向に連続回転する。そして、入力用モータの回転数に対し、設定した減速比率に応じた出力歯車の回転数が得られる。

#### 4. 機械式制御型の複合伝達型 CVT の設計

L-CVT 試作機 (図 2) は伸縮用モータが四つ取り付けられているため、電力の外部エネルギーを必要とする。また、連結リンクの伸縮用位置制御には高精度な制御が求められている。そこで、外部電源を用いることなく、入力軸に加わる力 (トルク) の一部をそのまま利用して機械的な動力伝達により、連結リンク  $c, c'$  を伸縮する機構について述べる。

##### 4.1 カムを用いた連結リンクの伸縮機構

L-CVT 試作機の四節リンク (図 1(a)) のリンク長さは、 $a = d = 150$  [mm],  $b = 90$  [mm] である。 $b$  は本来、伸縮機構になっているので可変であるが、今回は、変速用としてのリンク長さの変化はしないことにする。 $c = 100 \sim 190$  [mm] はスライドラール上を動く可変範囲である。入力周波数を  $f$  [Hz], 角速度を  $\omega$  [rad/s] とすると、時刻  $t$  [s] における入力

軸の角変位  $\theta(t)$  [rad] は

$$\theta(t) = \omega t = 2\pi f t \quad (1)$$

で表される。 $f = 1.0$  [Hz] のときの出力リンク  $d, d'$  の揺動の速度を等速度にする (揺動角度と時間の関係のグラフが三角波になる) ための、リンク  $c, c'$  の伸縮応答を図 3 の実線 (青色線) で示す。(点線 (赤色線) については後章で述べる)。一周期間隔で、特異点 (連続であるが、微分不可能な点) が二か所に現れている。 $(t = 0.1, 0.6, 1.1, 1.6$  [s] 付近)。これらの点は、出力リンク (てこ)  $d, d'$  の往復運動の方向が切り替わる時に発生している。

連結リンク  $c, c'$  を伸縮させる機構として、カムを用いると、外部の動力源を用いる場合と比べて、減速機としての機能を確実に果たすと考えられる。つぎに、カムの設計について述べる。連結リンクの伸縮量に対応したカム曲線  $c(t)$  ( $c'(t)$ ) は、極座標

$$c(t) = R(\theta(t)) \quad (2)$$

で表される。ここで、 $\theta$  [rad] は入力角度 (図 1 参照) であり、(1) 式で示される。

##### 4.2 二つの確動カムを用いた伸縮機構

前節で得られたカム曲線をもつカムの駆動法について述べる。一般のカム機構は、カム、およびカムと接触して追従するカムフォロアから構成される。カムとカムフォロアが常に接触して位置的拘束が成り立つためには、押し付け力を生じさせるためのスプリング等の部品や他の加圧手段が必要である。加圧部品を取り付ける際に、伝達機構内に伝わる力関係を考えると、加圧手段によってリンク内に内力が生じるため、入力と出力間の力関係には、仮想仕事の原理が単純に成立しなくなることが考えられる。そのため、溝カム等の確動カムを使うのが理想的である。L-CVT の開発の最終目的は、クランク (図 1, b, b') も変化させて、変速することである。連結リンク  $c, c'$  の伸縮に加えて、クランク長さの変化も対応させるために、今回設計している平面カムは回転軸方向に沿ってカム曲線が異なるので、最終的

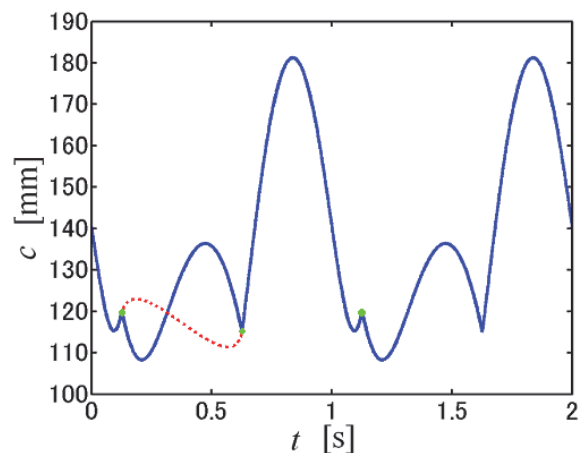
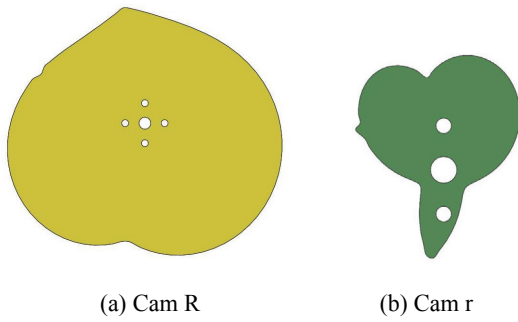
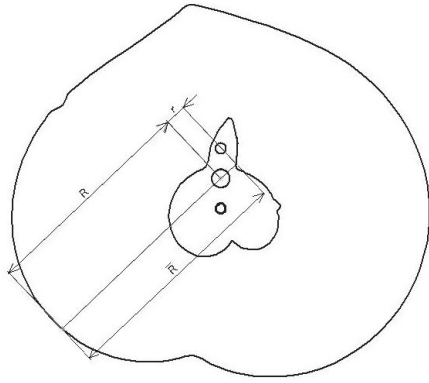


Fig. 3 The response of the length of link  $c$



(a) Cam R (b) Cam r

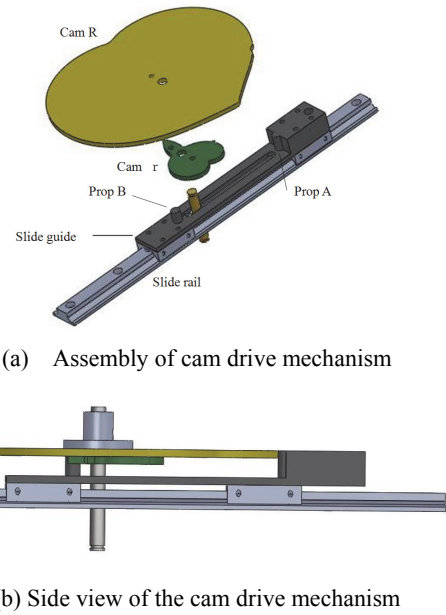


(c) Difference between cams' curves

Fig. 4 Cam R and Cam r

には立体カムとなる。本論文では、減速比率を考慮して、出力回転が入力回転に応じた速度になることを目的としているため、まず、平面カムを設計する。将来的に 3D カムに取り換えることができるように、互換設計とする。

本論文では、確動カムの一つとして、二つの平板カムを重ね合わせた新たな構造を提案する。二つの平板カム R, r を図 4(a), (b) に示す。これらの二つの平板カムを重ねたカム (図 4(c)) を用いて連結リンク  $c, c'$  の伸縮を完全に機械的におこなう。(1)式で示される回転角  $\theta(t)$  におけるリンク長さ  $c(t)$  は図 3 に示すように算出された。この  $c(t)$  をもとに設計するカム線図は (2)式で表された。この  $c(t)$  を用いて、カム R (図 4(a)) とする。リンクの伸縮を行う際にカム R を確動させる役割をもつカムを別途、カム r (図 4(b)) とする。つぎに、カム R とカム r を一体化する方法を説明する。回転軸を中心に、互いの位相  $\theta$  を決めて  $\theta = 0$  [rad] で二枚を重ね合わせる。任意の位相  $\theta$  におけるカム R の変位から回転中心までの距離  $R(\theta)$  と、回転軸を通る延長線上でカム R の変位から回転軸を通して長さが一定 ( $\bar{R}$  とする) になる点をカム r の変位  $r(\theta + \pi)$  とする。そして、これを  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  の範囲で同様に求めて、一周期の角変位分のカム変位  $r(-\pi) \sim r(\pi)$ ,  $(r(\pi) \sim r(3\pi))$  をとる。つまり、カム R の変位  $R(\theta)$  とカム r の変位  $r(\theta + \pi)$  との和  $\bar{R}$  が、どの位置においても等しくなるように設計している。この関係は



(a) Assembly of cam drive mechanism

(b) Side view of the cam drive mechanism

Fig. 5 Cam drive mechanism

$$R(\theta(t)) + r(\theta(t) + \pi) = const. \equiv \bar{R} \quad (3)$$

で表される。カム R とカム r はそれぞれ、図 5 に示すように、スライドレール上に取り付けられる。

(3)式中の距離  $\bar{R}$  は、スライドガイドに設けられた二本の支柱の間の距離 (図 5 (a) 中の Prop A, B 間の距離を  $\bar{R}$  とする) と等しい。この  $\bar{R}$  は任意に決めることができるが、この値はカム (図 4(c)) とカムフォロア (図 5 (a) 中の Prop A, B) との接触角に関係するので、適切な値を選ぶ必要がある。

本研究では  $\bar{R} = 80$  [mm] とした。確動カム機構の側面図を図 5 (b) に示す。スライドレールにはスライドガイドが取り付けられており、スライドガイドには二つの支点 (二本の支柱 Prop A, B) が取り付けられている。それらの二つの支点に、カム R とカム r が接している。図 5 (b) で、スライドレールが右方向へ移動するときには、カム R は支点 (支柱 A) を押しながら回転し、スライドレールが左方

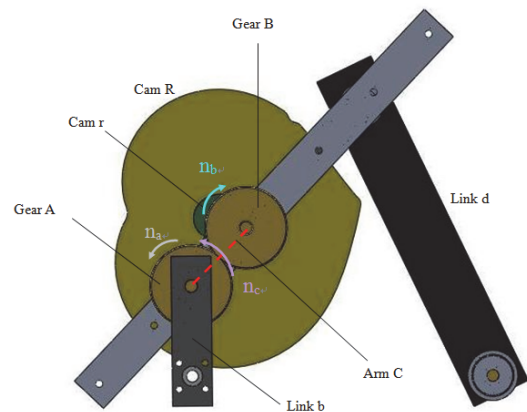


Fig. 6 Cam which is driven by planetary gear train

向へ移動するときには、カム r は支点（支柱 B）を押しながら回転する。

### 4.3 確動カムの回転駆動機構

クランク（図 1, b, b'）の回転力を使って、カムの回転が同期しながら駆動する機構を図 6 に示す。ギヤ A とギヤ B はそれぞれモジュールと歯数が等しい同じ歯車である。ギヤ A はクランク b の回転軸とは反対側の連結リンクとの回り対偶の箇所で取り付けられている。つまり、ギヤ A の回転軸は連結リンク c の片方の回転軸と同軸になっている。ギヤ B と確動カムは一体となって回転する。ギヤ A とギヤ B からなる機構は遊星歯車機構となっている（図 7）。遊星歯車機構は太陽歯車、遊星歯車、および遊星キャリアで構成されている。本設計では、ギヤ A が太陽歯車、ギヤ B が遊星歯車、腕 C が遊星キャリアに対応している。

太陽歯車 A および遊星キャリア C がそれぞれ  $n_a$ ,  $n_c$  [rpm] の回転数で回転するとき、遊星歯車 B の回転数  $n_b$  は(4)式のように表される。

$$n_b = \left(1 + \frac{z_a}{z_b}\right)n_c - \frac{z_a}{z_b}n_a \quad (4)$$

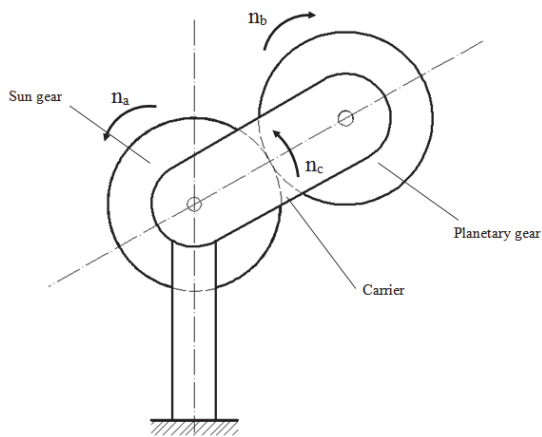


Fig. 7 Planetary gear train

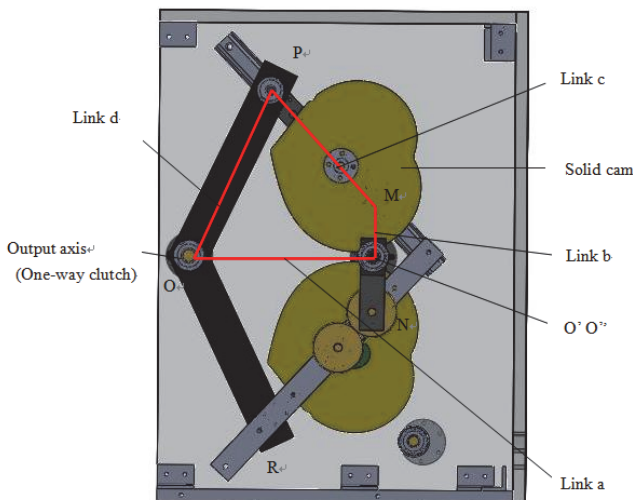


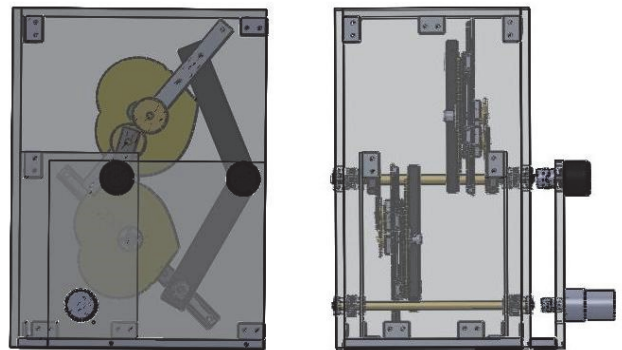
Fig. 8 The proposed fully mechanical based L-CVT

ここで、 $z_a$  は太陽歯車 A の歯数、 $z_b$  は遊星歯車 B の歯数である。本設計の場合には、太陽歯車 A と遊星キャリア C は一体となっている（固定されている）ので

$$n_a = n_c \quad (5)$$

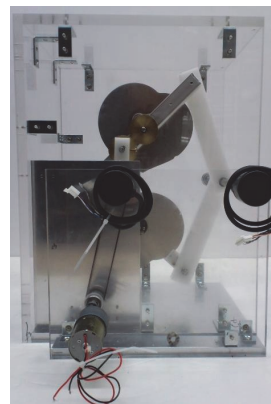
が成り立つ。太陽歯車 A と遊星歯車 B の歯数はそれぞれ等しいので、(4), (5) 式から

$$n_a = n_b = n_c \quad (6)$$



(a) Front view

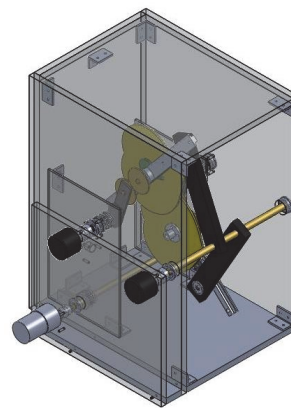
(b) Side view



(c) Front view (photo)



(d) Side view (photo)



(e) 3D view



(f) 3D view (photo)

Fig. 9 General view of L-CVT

となる。よって、入力軸が一回転する度に、確動カムは一回転することになる。

以上、入力回転力（トルク）のエネルギーを利用して、本提案の確動カムを回転させることができ、カムの回転によって連結リンク  $c, c'$  を伸縮させて、出力リンク  $d, d'$  の揺動を等角速度運動にできる。よって、電気的には無制御の下で無段変速機として機能を果たすことが可能となる。

#### 4.4 機械式制御型 L-CVT の開発

四節リンク機構、ワンウェイクラッチ、確動カム、および確動カム回転駆動を備えた L-CVT の機構の正面図を図 8 に示す。図中の実線で描かれてある四角形（赤色線）は四節リンク機構と対応させて示している。図 1(c) に示すように、同一平面（垂直面）上に、四節リンク機構が対称に配置された構造になっている。二つの確動カムは固定リンク ( $a, a'$ )（直線  $O'(O'')$  -  $O$ ) に対して対称的に、同じ形状のものが用意されて配置される。（上側の四節リンク機構のクランク部はカムにより隠れているため示されていない）。製作した試作機を図 9 に示す。筐体は透明アクリル板で組まれているため、動作が外から観察できる。回転軸  $O', O''$  は同軸上にあるため機械的に同期している。入力モータの回転軸から入力軸（回転軸  $O', O''$ ）へタイミングベルトを用いて駆動させる。回転軸  $O', O''$  と、出力軸  $O$  にはロータリーエンコーダがとりつけられており、回転角が測定できる。分解能は四通倍で  $0.036$  [°/pulse] である。本設計は、四節リンク機構を地面に対して垂直に配置しているため、リンクの自重によるたわみ等は軽減されている。クランク（リンク  $b, b'$ ）の回転軸を同軸として配置したため、クランクは伸縮範囲がゼロから出来るだけ長くとれる設計となっている。このクランクの伸縮範囲が長ければ長いほど、無断変速機の変速範囲が大きくなる。リンクの伸縮機構をモータからカム機構へ変更したことにより、伸縮用モータで消費されていた電力消費量をなくし、かつ、伸縮用モータを電気的に制御する必要がなくなった。カムは一周期においてカム線図の位相  $\theta$  に関する微分値が不連続な特異点が二か所存在しているために動作がスムーズにおこなわれないことがあったため、新しいカムの設計を提案する。L-CVT はラチェットやワンウェイクラッチ等の非可逆的な滑り対偶を用いており、一周期のうち、非駆動の一方に動く出力リンク（てこ）の区間においては、速度が連続であれば任意に設定することに着目した。図 3 の点線（赤色線）の曲線は、出力リンクへの非駆動の区間において、始点と終点で変位と速度が連続になるように設定されている。この方法により、カムとリンクは滑らかに動作する。

#### 5. 結言

本論文は、従来の CVT のように、摩擦伝動方式を用いることのない CVT を提案した。四つのリンクは回り対偶によって結合され、四つのリンクのうち一つ以上のリンクが滑り対偶によって二つの一直線上

に並べたリンクで結合されている、閉リンク機構をもった L-CVT について提案した。一つの完全回転する回り対偶を入力軸とし、ここからリンクの回転エネルギーの一部をリンク上の滑り対偶を動作させるエネルギーに変換することで、四つのまわり対偶の内、二つのまわり対偶の相対的な回転数比を一定保持する機構を開発し、これを無段変速機として定義した。とくに本論文では、すべり対偶を完全機械的に動作させるために確動カムを用い、そのカムの形状設計について説明した。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（C）課題番号 26420880（平成 26 年度～継続中））の助成を受けて実施された。

#### 参考文献

- 1) 内山勝, パラレルマニピュレータの機構と特性, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 6, pp. 715-720, 1992
- 2) 内山勝, 佐渡友哲也, 益川和之, パラレルロボット HEXA の動的制御実験, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No.2, pp. 297-304, 1996.
- 3) 高橋泰輔, 村上彰勘, 佐藤悠貴, 湯川俊浩, 並列四節リンク機構を用いた無段変速機の開発, 日本機械学会東北支部 第 48 期総会・講演会, 174, 2013
- 4) 熊田哲也, 湯川俊浩: “四節リンク機構を用いた無段変速機のシミュレーション” 計測自動制御学会東北支部 45 周年記念学術講演会,(2009).
- 5) 湯川俊浩, “四節リンク機構を用いた無段変速機の検討”, 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2P1-A21, (1)-(2), (2008) .