

計測自動制御学会 東北支部 第285回研究集会 (2013.12.7)

資料番号 285-6

四節リンク機構を用いた無段変速機の開発 (GAを用いたリンク長の最適化)

Development of continuously variable transmission with four bar linkage (Optimization of link length using Genetic Algorithm)

○佐藤 悠貴*, 村上 彰勘*, 湯川 俊浩*, 江刺家 哲朗**, 金子 昌晴**, 大島 修三***
○ Y.Sato*, A.Murakami*, T.Yukawa*, T.Esasika**, 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センター

Engineering Technology Office, *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 (Four Bar Linkage)
てこ・クランク機構 (Lever-Crank Mechanism), 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)
多目的最適化 (Multi-Objective Optimization), 実数値遺伝的アルゴリズム (Real-Coded Genetic Algorithm)

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 : 019-621-6063, FAX : 019-621-6403, E-mail : yukawat@iwate-u.ac.jp

1 緒言

1.1 L-CVTの原理

無段変速機 (CVT) は, 自動車や加工機械等にみられるように連続的に変速可能な変速機の一つであり, 特に小排気量の自動車を中心に広く利用されている. 自動車においては, CVTによってエンジンは常に効率の良い回転域を維持しながら変速をすることで燃費改善効果が期待できる一方, 機構単体の伝達効率や, 油圧損失等に課題がある.

このような課題に対して, 四節リンク機構を用いた無段変速機 (L-CVT) が提案されている¹⁾. L-CVTは, 図1に示すように四節リンク機構のリンク長さを連続的に変化させることで無段変速を実現し, かつ, ラチェット機構やワンウェイクラッチによって油圧を用いない動力伝達を可能としている. また, リンクの伸縮によって, 出力角速度がゼロとなるまで減速することできる可能性があり, これは一般的なCVT (ベルト式, トロイダル式) にはない特長である.

一方で, L-CVT特有の課題として, 変速比の周期的な変動があり, カム機構を用いて変動を除去する方法が提案されている²⁾ が, 機構の複雑さや振動といった面に問題があると考えられる. 本研究では, リンク長さの最適化による設計変更のみで, 変速比変動を最小化する手法を提案する.

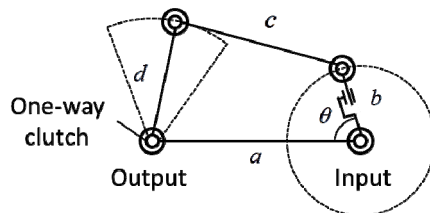


Fig.1 Fundamental mechanism of L-CVT

1.2 従来のL-CVT

L-CVTに使用する四節リンク機構は, てこ・クランク機構と呼ばれ, 四つのリンクで構成されている. 入力軸の回転によって最も短いリンクが入力リンクとして回転し, 連結リンクが動力を伝達し, 最終的に出力リンクの揺動のうちの一方の揺動方向のみをワンウェイクラッチを介して出力軸へ出力する. 固定されているリンクが固定リンクであり, その両端がそれぞれ入, 出力軸である.

L-CVTは四つのリンクのいずれかを伸縮させることで変速をおこなうことが可能である. 従来の手法では, 回転する入力リンクを伸縮させる手法¹⁾と, 揺動する出力リンクを伸縮させる手法³⁾ (図2) が提案されている. ワンウェイクラッチによって正回転と逆回転を周期的に繰り返す出力リンクの揺動を一方の回転のみ出力させる. したがって, 出力は間欠的である. 連続的に回転させる, てこ・クランク機構を二組, または四組といった複数組使用し, 回転の位相をずらすことで連続的な出力を実現している. したがって, L-CVTの出力は図3のような波形を示す. 出力は, ワンウェイクラッチの方向に応じて入力回転に対して正回転と逆回転の二通りの出力方向が存在する.

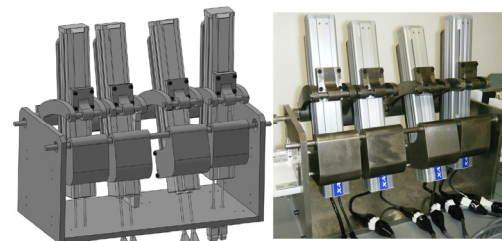


Fig.2 Conventional L-CVT

2 L-CVTの最適設計

2.1 設計方針

伸縮機構のを出力リンクに取り付けると配線の取り回しが容易である。しかし、出力リンクは入力リンク長さよりも短く縮めることができない。てこ・クランク機構が成立するためには、入力リンクが最短でなければならないためである。よって、出力角速度がゼロとなるまでの減速が不可能である。本研究では、てこ・クランク機構において唯一伸縮の下限がゼロである入力リンクを伸縮させることで、出力角速度がゼロとなるまでの変速が可能となるL-CVTの検討をおこなう。

四節リンクの組数に関しては、組数を増やすほど変速比変動は減少するが、コスト等の配慮から、組数は四組程度が妥当であると考え³⁾。

従来研究として、L-CVTにおける四つのリンク長さの厳密な検討がされていない。よって、本研究では、リンク長さの最適化による変速比変動の軽減を検討する。

2.2 リンク長さの最適化問題

本研究における問題は各リンク長さを設計変数とした、変速比変動の最小化問題である。しかし、変速機として実用性を持たせるためには、十分な変速幅とコンパクト性を満足させる必要がある。したがってこの問題は変速比変動最小化、変速幅最大化、サイズ最小化の三つの目的関数を指針とした多目的最適化問題である。

多目的最適化問題は、解が一つに定まらない場合が多い。これは例えば、複数の目的関数がお互いにトレードオフの関係にある場合、トレードオフの比率が異なる多様な解が存在するためである。複数の目的関数が存在する場合において、他の目的関数を改悪させずに、一つの目的関数において改善をおこなうことを、パレート改善と呼び、一つの目的関数においてこれ以上パレート改善をおこなうことができず、他の目的関数を改悪しないと改善不可能となるような解を、パレート最適解と呼ぶ。パレート最適解は各目的関数の重みに応

じて複数、多くは連続的に無数存在しており、パレート最適解の集合が目的関数空間において形成する曲線、曲面はパレート最適フロントと呼ばれる。多目的最適化問題においては、多様なパレート最適解を求めることが本質的な問題である。最終的にパレート最適解集合の中で設計者の意図に沿うような一つの最適解を選択すればよい。

パレート最適解を求める手法は大きく分けて二種類存在する⁴⁾。一つはスカラー化手法と呼ばれる手法で、各目的関数を重み付け、制約条件化、優先順位等の設定をおこなうことで単一目的化し、パレート最適解得る方法である。二つ目は進化的計算による手法で、遺伝的アルゴリズム (GA) による手法が代表的である。二つの手法の違いは、前者は各目的関数の優先度を決める必要があることと、一度の解の探索で一つのパレート最適解しか得られないのに対して、後者は優先度を決める必要はなく、かつ一度の探索で多くのパレート最適解を求めることができる。本研究の多目的最適化問題においては、遺伝的アルゴリズムを採用する。

2.3 制約条件

L-CVTの設計において、設計変数 (リンク長さ) にいくつかの制限が存在する。L-CVTに使用する四節リンク機構の四つのリンク、固定リンク、入力リンク、連結リンク、出力リンクにおけるそれぞれの長さを a, b, c, d とする。

L-CVTにおいては、入力リンク長さ b を連続的に変化させて変速をおこなう。この b の最大長さ $b_{\max}$ を1と定義し、この長さを基準とした比率で a, c, d の長さを表す。これによって相似形の四節リンク機構の考慮を省くことができ、さらに設計変数を3つに減らすことができる。

てこ・クランク機構であるための条件は、最短リンクが回転するための条件 (最短リンク長さと最長リンク長さの和が、他の二つのリンク長さの和以下であること) であるグラスホフの定理と、常に最短リンクが入力リンクであることを同時に満足すればよい⁵⁾。また、設計の巨大化を防ぐため、便宜的にリンク長さ a, c, d の最大長さを20と定めた。

以上より、本研究における制約条件を以下のように定義する。

$$b_{\max} = 1 \quad (1)$$

$$0 \leq b \leq b_{\max} \quad (2)$$

$$b_{\max} \leq a \leq 20 \quad (3)$$

$$b_{\max} \leq c \leq 20 \quad (4)$$

$$b_{\max} \leq d \leq 20 \quad (5)$$

$$b_{\max} + \max(a, c, d) \leq a + c + d - \max(a, c, d) \quad (6)$$

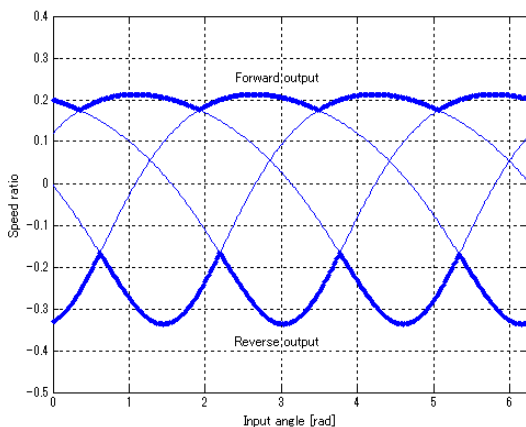


Fig.3 Output of L-CVT

各設計変数によって形成される空間は設計変数空間と呼ばれ、本研究においては a - c - d の三次元空間として視覚化が可能である。前記の制約条件によって、設計変数空間はおおまかに図4のような領域に制限される。

2.4 目的関数の定義

本研究における設計の目的は、サイズの最小化、変速幅の最大化、変速比変動の最小化の三つである。

特定の a, c, d の設計変数を与えたとき、四組の四節リンク機構の最終的な変速比は以下のようにして求められる。(各変数は図5を参照)ただし $\max_{n \leq X \leq m} f(X)$, $\min_{n \leq X \leq m} f(X)$, $\text{mean}_{n \leq X \leq m} f(X)$ は X の定義域 $n \leq X \leq m$ における $f(X)$ の最大値, 最小値, 平均値を表している。

$$0 \leq b \leq 1 \quad (7)$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (8)$$

$$L(b, \theta) = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta} \quad (9)$$

$$\alpha_1(b, \theta) = \cos^{-1}\left(\frac{a^2 - b^2 + L^2}{2aL}\right) \quad (10)$$

$$\alpha_2(b, \theta) = \cos^{-1}\left(\frac{d^2 - c^2 + L^2}{2dL}\right) \quad (11)$$

$$\theta'''(b, \theta) = \begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2, & 0 \leq \theta < \pi \\ \alpha_2 - \alpha_1, & \pi \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (12)$$

$$R_i(b, \theta) = \frac{d\theta'''(b, \theta + \frac{\pi}{2}i)}{d\theta}, i = 0, 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$R_{\text{output}}(b, \theta) = \begin{cases} \max_{i=0,1,2,3} (R_i) \\ \max_{i=0,1,2,3} (-R_i) \end{cases} \quad (14)$$

(15)式は最終的な変速比を表しており、任意に b の値を決めることで図3のような波形を示す。出力リンクの揺動において、入力リンクの回転方向に対して出力回転が正回転と逆回転の二通り考えられる。てこ・クランク機構は早戻り機構とも呼ばれるように、出力の正回転と逆回転（早戻り）では変速比が異なる。ワンウェイクラッチの出力方向を変えることで出力回転方向の切り替えが可能で

ある。

以上より、三つの目的関数、サイズ S 、変速幅 RW 、変速比変動 RC を定義する。

2.4.1 サイズ

伸縮する b 以外のリンク長さの総和を機構全体の大きさの指標と定義した。

$$S = a + c + d \quad (15)$$

2.4.2 変速幅

一般的に変速機の変速幅の大きさを示すパラメータとして、最大変速比を最小変速比で除した、全変速比幅（レシオカバレッジ）という概念がある⁶⁾。しかし、本研究におけるL-CVTでは最小変速比は常に b がゼロの時の $R_{\text{output}}(0, \theta) = 0$ であり、全変速比幅においては分母がゼロになってしまうため変速幅の大きさを適切に表現できない。したがって、上記のように最大変速比と最小変速比の差によって定義した。図3に示すように、 θ の変化に伴って変速比が変動しているため、 θ における平均値を、あるリンク長さ b における実質的な変速比と考えている。

$$\begin{aligned} RW &= \max_{0 \leq b \leq 1} \left[\text{mean}_{0 \leq \theta \leq 2\pi} \{ R_{\text{output}}(b, \theta) \} \right] - \max_{0 \leq b \leq 1} \left[\text{mean}_{0 \leq \theta \leq 2\pi} \{ R_{\text{output}}(b, \theta) \} \right] \\ &= \max_{0 \leq b \leq 1} \left[\text{mean}_{0 \leq \theta \leq 2\pi} \{ R_{\text{output}}(b, \theta) \} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

2.4.3 変速比変動

変速比の変動の大きさは、あるリンク長さ b の θ の定義域における変速比の最大値と最小値を求め、それをリンク長さ b の定義域において平均を取り、表現している。

$$RC = \text{mean}_{0 \leq b \leq 1} \left[\max_{0 \leq \theta \leq 2\pi} \{ R_{\text{output}}(b, \theta) \} - \min_{0 \leq \theta \leq 2\pi} \{ R_{\text{output}}(b, \theta) \} \right] \quad (17)$$

各目的関数をそれぞれ座標軸として考えた空間を目的関数空間と呼び、本研究においては S - RW - RC

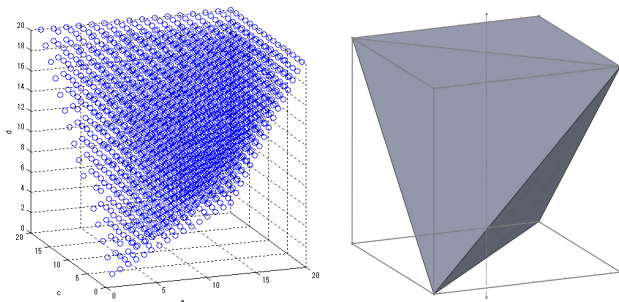


Fig.4 Design variable space constrained

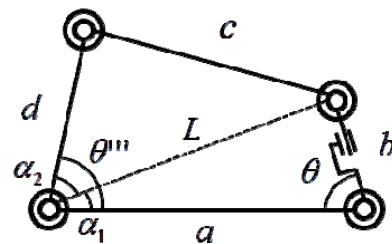


Fig.5 Parameters of for bar linkage

の三次元空間として視覚化が可能である．設計変数空間の一つの点に対応して目的関数空間に点を打つことができる．この目的関数空間において， S と RC 軸方向になるべく小さく， RW 軸方向になるべく大きくなるような座標に点を打つことができる設計変数を決定することが本研究の多目的最適化問題である．

まとめると，本研究は三つの目的関数 S, RW, RC における，三つの設計変数 a, c, d の多目的最適化問題である．最終的には，従来機の設計値($a=15, b=1, c=15, d=2.5 \sim 12.5$)におけるパラメータ $S=42.5, RW=0.2887, RC=0.0452$ と比較し，パレート改善されるようなリンク長さ a, c, d の値を導出することが本研究の目的である．

3 最適化手法

3.1 遺伝的アルゴリズムによる最適化

GA手法は生物の進化過程をモデルとした手法である．ランダムな設計変数の組み合わせ(個体)を複数発生させ，交叉と呼ばれる操作によって二つの親個体の性質を引き継がせた子個体を発生させ，選択と呼ばれる操作によって優れた個体を選び，次世代に残す．この一連の流れを一代とし，予め設定した最終世代まで繰り返し，最後に残った個体を最も優れた最適解とする手法である．本研究においては，ランダムにリンク長さ a, c, d を複数発生させ，最適化をおこなう．

3.2 実数値GAを用いた多目的最適化

従来のGAにおける交叉法として，個体の設計変数を生物の遺伝子を模倣した二進数に変換(バイナリコーディング)し，遺伝子进行操作するように設計変数进行操作する手法が基本的な交叉法として用いられてきた．しかし，二進数において親2個体の性質を引き継がせた子個体の設計変数が，十進数に戻す(デコード)時も類似しているとは限らないという問題がある．一方で，小野ら⁷⁾が提案している二進数化を行わず，設計変数をそのまま用いた交叉をおこなう実数値GAと呼ばれる方法があり，形質遺伝性，変数間依存性，統計量の遺伝といった面で優れている⁸⁾．実数値GAを用いた手法は，多目的最適化問題であるカメラのレンズ系の設計において，単峰性正規分布交叉

(Unimodal Normal Distribution Crossover : UNDX)と非パレート淘汰戦略(Pareto Optimal Selection Strategy : POSS)を組み合わせた手法が提案されており⁹⁾，船舶の改良においても実績を上げている¹⁰⁾．

実数値GAにおける代表的な交叉法であるUNDXは，設計変数空間において親個体をランダムに三つ選び，正規分布乱数を用いて親の周辺に子個体を生成する交叉法である．親1と親2を結ぶ直線を乱数発生の主軸とし，その主軸から親3までの距離に応じた広さで子が発生させる．設計変数空間で親の近くに子が発生するため，必然的に子

は親に近い値の設計変数となる．また，二進数GAにおいては突然変異と呼ばれる多様性維持を目的とした操作が用いられているが，このUNDXが突然変異と交叉の機能を兼ねていることも大きな特長である¹¹⁾．交叉の様子を図6に示す．

UNDXの問題点として，悪スケール性に弱いという指摘¹²⁾がされているが，本研究においては，設計変数空間 $a-c-d$ の定義域や単位が等しいため，悪スケール性は存在しないと考えられる．したがって，UNDXは本研究において十分な探索性能を発揮できると考えられる．

3.3 世代交代モデルPOSS

世代交代モデルとは，各世代での親の選択や生存者選択を決定するモデルのことであり，多目的最適化においては各世代で，非劣解と呼ばれる最も優秀な解(最もパレート最適解に近い解)を常に次世代へ残していくモデルが望ましい．POSSと呼ばれる世代交代モデルは，各世代の非劣解をそのまま次の世代に残すというシンプルなモデルである．しかし，世代を重ねるにつれて保存個体が際限なく増加する可能性がある．個体が一部に集中すると全体として多様性のある解を得られ難くなる．

3.4 世代交代モデルSPEA2

POSS手法には，生存個体に上限がないため，多様性を失う可能性がある．一方，数多く提案されている多目的GA手法の中には，アーカイブと呼ばれる，非劣個体を保存しておくための器に一定数の非劣解を選択して保存する手法がいくつか存在する^{13),14)}．NSGA-II(Nondominated Sorting Genetic Algorithm II)とSPEA2(Strength Pareto

Evolutionary Algorithm 2)はそのようなアーカイブを備えたGA手法の代表的な手法である．どちらの手法も，目的関数空間における個体距離の概念を用いて，お互いに隣り合う距離が遠い個体をアーカイブに保存することで，制限された個体数の中で多様性を確保している．特に，各目的関数の両端(最大と最小)の値を持つ個体は必ず保存さ

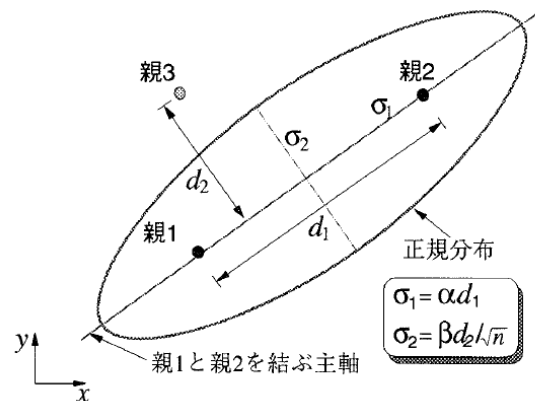


Fig.6 Unimodal Normal Distribution Crossover⁷⁾

れる仕組みとなっている．このNSGA-IIとSPEA2の二つの手法において，アーカイブ保存個体の選別法が妥当である⁴⁾とされているSPEA2手法を本研究では用いる．

SPEA2のアルゴリズムの流れはおおまかに以下のとおりである¹³⁾．

- ①初期母集団と，空のアーカイブを生成する．
- ②全個体の適合度値を割り当てる．
- ③母集団の非劣解を，次世代のアーカイブに保存する．非劣解の数がアーカイブの上限より大きいとき，アーカイブ端切り手法を用いて削減をおこなう．逆に非劣解の数が少ない場合は，アーカイブを全て満たすまで非劣個体をコピーする(本研究では計算負荷の観点からコピーを行っていない)．
- ④もし終了世代であるとき，ここで終了する．
- ⑤新たなアーカイブの中から，メイティング選択によって新たな次世代母集団を一定数選択する．
- ⑥新たな母集団に対して交叉，突然変異オペレータを実行する．

3.4.1 適合度割り当て法

SPEA2では，まず全ての個体に対して，その個体が支配している他の個体(全目的関数の値において劣っている他の個体)の数を求め，その値を強度値(strength value)とする．次に，全個体に対して，自分自身が支配されている全ての個体に対して，各強度値の総和を求め，その値を適応度値(fitness value)とする．図7に示すように，非劣解は支配される個体が存在しないために適応度値はゼロとなり，劣っている個体ほど適応度値が高い．

3.4.2 アーカイブ端切り手法

非劣解の数をアーカイブの上限まで削減するためのアーカイブ端切り手法(archive truncation method)のアルゴリズムの流れを以下に示す．概略図は図8に示す．

- ①目的関数空間において隣り合う距離が最も近い個体のペアを選択し，この二個体を削減候補とする．

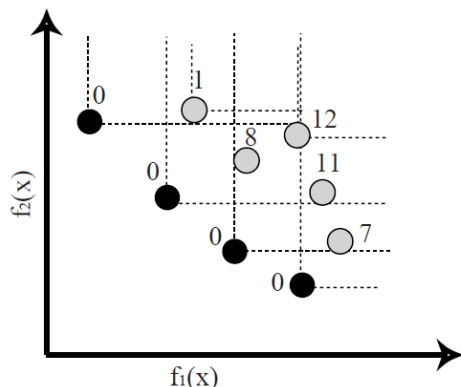


Fig.7 SPEA2 fitness assignment⁴⁾

- ②二つの個体それぞれで， k 番目に接近している個体までの距離を計算し，比較をおこなう．はじめは $k=2$ である．

- ③二つの個体のうち，比較した距離が小さい方の個体を削減する．距離が同じだった場合， $k=k+1$ として②に戻る．このような方法によって非劣解の数がアーカイブの上限になるまで繰り返し削減する．

この手法の大きな特長は，各目的関数軸において端にある個体が必ず削減対象とならないことである．これは，選択される全ての個体が非劣個体であることと，最小距離を半径，削減候補二個体を中心とした二つの円内には他の個体が存在しないという条件から導き出せると考えられる．

3.4.3 メイティング選択

アーカイブ個体から，交叉(Mate)をするための個体群(探索個体群)を選択する操作のことをメイティング選択と呼ぶ．これは優れた親個体を選択して効率的な探索をおこなうための操作である．メイティング選択には，複数の個体をランダムに指定し，最も優れた個体を選択するというトーナメント選択が用いられている．

3.5 目的関数のスケールリング

SPEA2手法ではアーカイブ端切り手法の計算に目的関数空間におけるユークリッド距離が用いられている．三つの座標軸におけるスケールが異なる場合，同じ”1”という距離の重みが異なるため，端切りが行われ易い方向と，行われ難い方向の差が生じ，妥当な端切りが行われていない可能性がある．各目的関数軸におけるスケールを等価とするために，スケールリングと呼ばれる以下の式のような操作が提案されている¹⁴⁾．

$$O_i' = \frac{O_i - O_{i,\min}}{O_{i,\max} - O_{i,\min}} \quad (18)$$

このように各目的関数軸における最大値と最小値の差の値を基準として各目的関数の値を正規化することで，各軸におけるスケールを等価とすることができる．

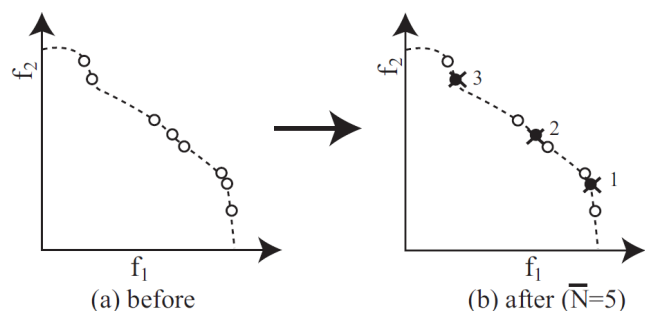


Fig.8 Archive truncation method used in SPEA2⁴⁾

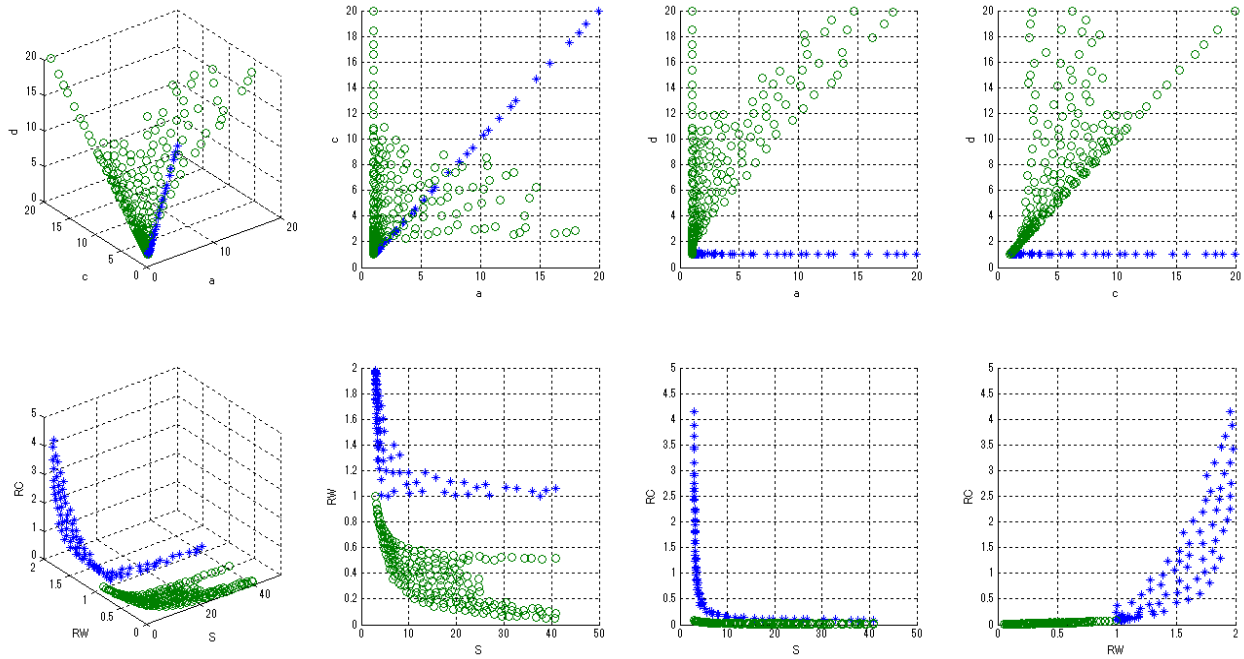


Fig.9 Pareto optimal solutions

4 実験

4.1 実験パラメータ

UNDX+SPEA2手法を用いて出力を正回転にしたときと逆回転にしたときの二通りの最適化を行った。UNDXにおけるパラメータは、 α を0.5、 β を0.35、交叉回数を1としている。世代数は10000世代、初期個体数は200、アーカイブサイズは200、母集団サイズは200、親の選択数は100として最適化を行った。

4.2 パレート最適解の分析

正回転と逆回転の二通りの最終世代のアーカイブ個体、合計400個体からさらに非劣解を選択し、最終的には285個体が本研究におけるパレート最適解として得られた。二つの手法によって生成したパレート最適解の分布を図9に示す。上段が設計変数空間、下段が目的関数空間であり、正回転出力を青色の“*”，逆回転出力を緑色の“○”としてプロットした。

得られたパレート最適解の中で、従来機のパラメータ $S=42.5, RW=0.2887, RC=0.0452$ をパレート改善している個体は、合計107個体得られた。

まず、最終的に得られた全てのパレート最適解285個体から、特長的な性能を持つ個体を選別する。選別の指標として、以下の7つの目的関数を用いた。

- ① $S \times RC / RW$ の値が最小
- ② RC / RW の値が最小
- ③ S / RW の値が最小
- ④ $S \times RC$ の値が最小
- ⑤ S の値が最小
- ⑥ RW の値が最大
- ⑦ RC の値が最小

Table 1 Distinguishing Pareto optimal solutions

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
a	1.00	1.00	1.01	17.98	1.00	1.01	17.98
c	1.01	19.97	1.01	2.91	1.00	1.02	2.91
d	1.00	19.97	1.00	19.89	1.00	1.00	19.89
S	3.02	40.95	3.01	40.78	3.00	3.03	40.78
RW	1.00	0.52	1.97	0.05	1.95	1.98	0.05
RC	0.08	0.02	3.89	0.01	4.14	3.42	0.01
Output	Forward	Forward	Reverse	Forward	Reverse	Reverse	Forward

得られた特長的なパレート最適解を表1に示す。

特長的な四節リンク機構の形状から、パレート最適解を四つに分類できると考えられる。

4.2.1 正方形型

全てのリンク長さが1に近い形状で、かつ出力が正回転である。条件①が該当する。特長としては、 S, RW, RC 全てがバランスよく良好である点が挙げられる。条件③、⑤、⑥も全リンク長さが1に近い形状であるが、性能の特長としては後述する平行四辺形型に該当すると考えられる。

4.2.2 二等辺型

c と d の値がほぼ等しい値をとり、かつ a が“1”に近い値をとる形状で、正回転側で多くみられる。条件②が該当する。特長としては RC の値を低く抑えながら、 RW の値も比較的良好な値を得ている点が挙げられる。

4.2.3 平行四辺形型

a と c の値がほぼ等しい値をとり、かつ d が1に近い値をとる形状で、条件③、⑤、⑥といった、逆回転出力における全てのパレート最適解が該当すると考えられる。特長としては、 RW の値が1以上の大きな値を得ている点が挙げられる。

4.2.4 台形型

d の値が最も大きく、四つのリンク長さの関係が $a+c=b_{\max}+d$ に近い値をとる形状で、正回転側でみられる。条件④、⑦が該当する。特長としては、 RC の値をかなり低く抑えられている点が挙げられる。

5 考察

得られたパレート最適解の分布図を見ると、両空間において、出力の正回転と逆回転の分布が全く混在しておらず、 $RW=1$ を境界として完全に棲み分けされていることが分かる。つまり、L-CVT において RW を "1" 以下にする設計を行いたいときは正回転出力を、"1" 以上にしたい場合は逆回転出力を用いることが最適であると考えられ、一つの設計指標とすることができる。

また、パレート最適解の分布が図4に示す制約空間の境界付近に集中する傾向も見られた。つまり、制約条件の境界付近の設計をおこなうことで、より性能の高い設計が可能となる可能性が考えられる。

現実的な設計において、入力軸と出力軸間の距離を決定する a の値が "1" に近いと入力リンクが回転する際に出力軸に干渉してしまうことが考えられるため、 a の値は 1.2 以上が望ましいと考えられる。最後に、設計例として、 a が 1.2 以上で従来機をパレート改善し、 RW が最大または RC が最小である解二通りを表2に示す。

6 結論

L-CVT におけるリンク長さの多目的最適化を、実数値 GA 手法と多目的 GA 手法を組み合わせた UNDX+SPEA2 手法を用いて 285 通りのパレート最適解が得られた。

パレート最適解が、設計変数空間における制約条件の境界付近に集中していることがわかった。パレート最適解の形状と性能の特長から、「正方形型」、「二等辺型」、「平行四辺形型」、「台形型」の四通りに分類し、それぞれの特長を示した。

従来の L-CVT の、サイズ、変速幅、変速比変動のパラメータ、 $S=42.5$ 、 $RW=0.2887$ 、 $RC=0.0452$

をパレート改善可能なリンク長さの組み合わせを 107 通り得られ、設計例として a の値が 1.2 から 1.3 の値をとる 7 通りのパレート最適解を示した。

今後、得られたパレート最適解とその傾向を参考にして、新たな L-CVT の寸法設計をする。

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究（C））、平成 23 年度～平成 25 年度（継続中）、課題番号 23560149 の助成を受けて実施された。

参考文献

- 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)
- 熊田，湯川：“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)。
- 高橋，村上，佐藤，湯川：“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，(2013)
- 渡邊真也：“遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化に関する研究”，同志社大学大学院 工学研究科 知識工学専攻 博士論文，(2003)
- 鈴木，森田：“基礎から学ぶ機構学”，オーム社，(2010)
- 守本佳朗：“無段変速機 CVT 入門”，グランプリ出版，(2004)
- 小野，佐藤，小林：“単峰性正規分布交叉 UNDX を用いた実数値 GA による関数最適化”，人工知能学会誌 14(6)，1146-1155，(1999)
- 樋口，筒井，山村：“実数値 GA におけるシンプレクス交叉の提案”，人工知能学会論文誌，16，147-155，(2001)
- 小野，小林，吉田：“単峰性正規分布交叉 UNDX を用いた実数値 GA とレンズ設計への応用”，遺伝的アルゴリズム (4)，産業図書，223-262，(2000)
- 平山，安東：“複数の載貨状態における造波抵抗低減に関する研究：実数値遺伝的アルゴリズムを用いた多目的船型最適化”，日本船舶海洋工学会論文集 (3)，189-195，(2006)
- 廣安，三木，福永：“遺伝的アルゴリズムにおける実数値ベクトル表現，世代交代モデル，母集団分割効果の検討”，同志社大学理工学研究報告 44(1)，25-35，(2003)
- 喜多，小野，小林：“実数値 GA のための正規分布交叉の多数の親を用いた拡張法の提案”，SICE システム/情報合同シンポジウム，(1998)
- E.Zitzler,M.Laumanns, L.Thiele: ” SPEA2 : Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm ” In Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, (2001)
- K.Deb,S.Agrawal,A.Pratap,T.Meyarivan : ” A fast and elitist multiobjective genetic algorithm NSGA-II”, IEEE Trans. on Evolutionary Computation 6(2), 182-197, (2002)
- M.Erickson,A.Mayer,J.Horn : ” The Niche Pareto Genetic Algorithm 2 Applied to the Design of Groundwater Remediation Systems”, First International Conference, EMO 2001 Zurich, Switzerland,(2001)

Table 2 Design examples

	RCmin	RCmax	Conventional
a	2.88	1.23	15
b	0~1	0~1	1
c	9.93	2.1	15
d	11.81	2.32	2.5~12.5
S	24.62	5.65	42.5
RW	0.296	0.515	0.289
RC	0.0189	0.0404	0.0452
Output	Forward	Forward	Forward