

A07 スマート副鏡のための変位拡大機構の最適設計再考

伊藤誠, 高巣遥, 小木曾望 (大阪府立大学)

Makoto Ito, Haruka Takasu, Nozomu Kogiso (Osaka Prefecture University)

1 緒論

高度化している宇宙観測ミッションに対応するため、大型かつ高精度なアンテナ鏡面を有するシステムが求められている。しかし、大型の鏡面を用いる一方で、理想鏡面との誤差が非常に小さいことが要求されるため、このようなシステムの実現はとても困難である。著者らが研究チームの一員として現在開発しているアンテナシステム^[1]の観測帯域が345GHzと非常に高い周波数帯であるため、鏡面誤差の制約がとても厳しいものとなっている。そのため宇宙空間上において、副鏡に搭載されたアクチュエータにより鏡面形状を制御し、主鏡に生じた鏡面誤差の影響を打ち消すことができるスマート可変副鏡の研究が進められてきた^[2]。特に、著者らは副鏡の形状を制御するアクチュエータに取り付ける変位拡大機構^[3]と呼ばれる構造に対して研究開発を進めてきた。

変位拡大機構の役割は、 piezoアクチュエータから出力される変位を拡大することで副鏡の制御に必要な変位を生み出すことである。古谷らはこの変位拡大機構のコンプライアントメカニズム化を検討し、出力変位の最大化を目的関数に持つ単目的最適設計問題として定式化し、最適形状を得ている^[4]。しかし、得られた形状について検討を重ねることによって、寸法のばらつきに対して性能の悪化が大きいといった問題点があることがわかってきた^[5]。

そこで、本研究では、変位拡大機構の形状と性能の関係をより詳細に調べるために、従来の単目的最適化問題から多目的最適化問題へと定式化を変更してPareto解を求めることにする。これは、従来よりも広い探索範囲から多様な最適解を探索するだけでなく、データ分析技術を用いてPareto解を解析することで変位拡大機構の設計に対する知見を得ることが可能となる。

2 副鏡と変位拡大機構

高度な宇宙観測ミッションを実現するために、より大型で高精度な鏡面を維持できる衛星搭載用アンテナシステムが求められている。このような要求に対して、主鏡の変形などにより生じる電波の位相誤差を、鏡面形状を能動的に変形させることで低減できる形状可変鏡システムが研究・開発されている。このようなシステムにおいて主鏡を形状可変とする場合、大型の鏡面に形状調整用アクチュエータのハーネス等を組み込む必要があるが、展開に対する信頼性低下の要因となる。そこで田中らは副鏡を形状可変鏡とすることで高精度アンテナシステムの実現を目指している。この形状可変

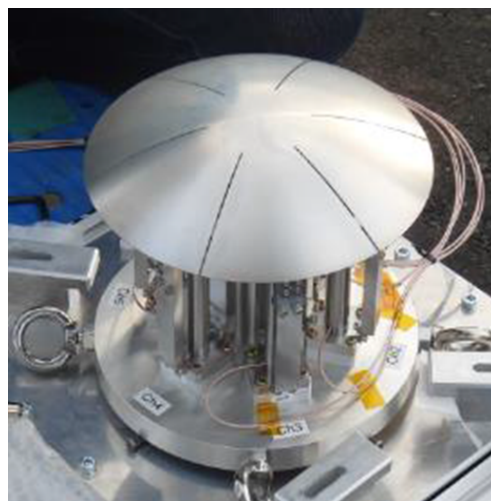


Fig. 1: Breadboard model of a smart reconfigurable reflector^[1]

副鏡システムのモデルを図1に示す。

副鏡鏡面は双曲面形状であり、スリットによって6枚に分割されている。このペタルは厚さ0.5mmのアルミニウム合金製であり、各ペタル下部に変位拡大機構付きのアクチュエータが1本ずつ、配置されている。

鏡面調整用アクチュエータには、高い精度で十分に大きな変位量を鏡面に与えることと、形状を維持するための十分な保持力を満たすことが求められる。そのためスマート形状可変鏡の試作モデルでは、積層型圧電アクチュエータ (PiezoMechanik社製 PSt 150/10/100 VS15) と変位拡大機構を組み合わせた構造を採用している。この鏡面調整用アクチュエータは、圧電アクチュエータで発生した変位0.1mmを変位拡大機構によって1mmに拡大し、副鏡に固定された変位拡大機構上面で副鏡を押すことで変位を伝える。

古谷らは、ネジ止めにより生じるガタから精度や耐久性の低下を懸念し、変位拡大機構をコンプライアントメカニズム^[6]化することで、これらを向上させつつ変位拡大倍率や変位保持力を保つことができる形状の開発を行ってきた。古谷らが寸法最適化に用いた変位拡大機構の幾何形状モデルと8つの設計変数(d)を図2に示す。ここで、変位拡大機構は下面を拘束し、アクチュエータからの入力変位がA、変位拡大機構の出力変位をBで示している。これらの設計変数は変位拡大機構が性能を発揮するために重要な寸法であり、感度解析によって互いに独立になるような変数として選択したものである^[3]。また、製造条件や配置条件から決

Table 1: Material constants of SUS304

Constant	Values
Young's modulus [GPa]	197
Poisson's ratio	0.30
Density [g/cm ³]	8.0

Table 2: Lower and upper limits of design variables (mm)

	Lower	Upper
d_1	85.0	125.0
d_2	18.0	25.0
d_3	18.0	25.0
d_4	45.0	90.0
d_5	0.5	1.5
d_6	0.5	2.0
d_7	2.0	8.0
d_8	2.0	8.0

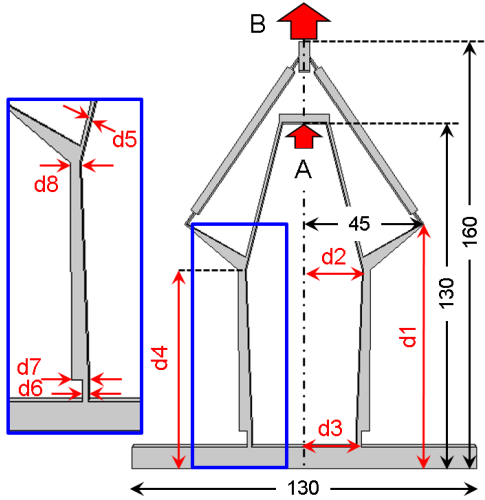


Fig. 2: Model of displacement magnifying structure

められた設計変数の側面制約を表 2 に示す。なお、材料は SUS304 であり、その材料特性を図 1 に示す。

3 変位拡大機構の多目的定式化と結果

本研究で考慮すべき性能は次の 3 つである。

- 固有振動数
- 出力変位量
- ミーゼス応力

ここでは初期検討として、固有振動数最大化、変位最大化の 2 目的を扱う。したがって、次式のように定式化する。

$$\max. : f_1(\mathbf{d}) = (\text{First natural frequency}) \quad (1)$$

$$f_2(\mathbf{d}) = (\text{Tip displacement}) \quad (2)$$

$$\text{s.t.} : d_i^L \leq d_i \leq d_i^U \quad i = 1, \dots, 8$$

ここで、 $f_1(\mathbf{d})$ は固有振動数、 $f_2(\mathbf{d})$ は図 2 の点 A に強制変位 0.1mm を与えたとき、点 B に生じる変位

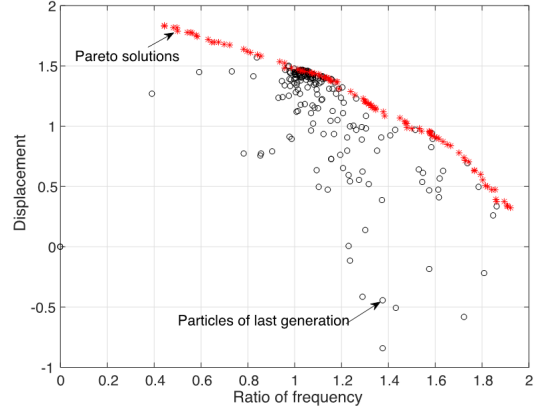


Fig. 3: Pareto solutions of DMS multi-objective optimization

大機構によって拡大した出力変位である。また、 d_i^L と d_i^U は設計変数の上下限值であり、表 2 に示している。

ここでは、設計変数空間と目的関数空間を以下のように正規化し、最適化を実行する。

$$d_i^* = \frac{d_i - d_i^L}{d_i^U - d_i^L} \quad (3)$$

$$f_1^*(\mathbf{d}^*) = f_1(\mathbf{d}^*)/100\text{Hz} \quad (4)$$

$$f_2^*(\mathbf{d}^*) = f_2(\mathbf{d}^*)/1.0\text{mm} \quad (5)$$

最適化アルゴリズムは多目的 PSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) を用いる。なお、粒子数を 200、世代数を 200、パーソナル加速度係数は 1、グローバル加速度係数を 2 とする。

最適化により得られた Pareto 解の目的関数空間での分布を図 3 に示す。振動数と変位がトレードオフの関係にあることがわかる。また、二つの目的関数ともに 1.0 が設計基準値であり、それらを満たす多くの候補が存在することがわかる。

4 Pareto 解のデータ分析とその考察

本研究では非階層型クラスタリング手法である k-means 法^[7]によって、図 3 に示した Pareto 解を 4 領域に分ける。したがって解をクラスタリングすることによって、構造と性能の関係の傾向を知ることができる。目的関数空間におけるクラスタリングの結果を図 4 に示す。クラスター 1 は変形量は大きい固有振動数は低く、逆にクラスター 4 は固有振動数は大きい変形量は小さいため、設計基準を満足しない。クラスター 2, 3 の一部が設計基準を満足している。

クラスターごとに分けられた Pareto 解について、設計変数とクラスターの間関係を考える。ここでは図 4 の各クラスターについて、多次元の変数を結合して次元を圧縮する主成分分析を行う。第 1 主成分の結果と、クラスターごとの最適解の 1 つを図 5 ~ 図 8 に示す。こ

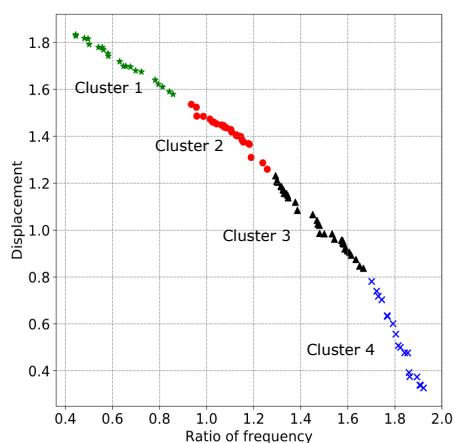


Fig. 4: Clustering result of Pareto solution using k-means

ここでクラスターごとの最適解の例は、各クラスターを特徴づける設計変数とともに表している。

以下にクラスターごとの特徴をまとめる。

- クラスター 1 は固有振動数が低く、変位が大きい。寸法としては d_4 , d_8 の成分の影響が小さい。つまり、脚の上部までの高さとその厚みには依存せず、中央板バネの厚さ (d_5)、足下の板バネの厚さ (d_6)、肘までの高さ (d_1) の影響が大きい。
- 固有振動数がやや低いクラスター 2 は脚上部の幅 (d_2)、足下の板バネの幅 (d_3)、脚上部までの高さ (d_4) に依存している。
- クラスター 3 は足下の板バネの幅 (d_3)、脚上部までの高さ (d_4) に支配されている。
- 固有振動数が高いクラスター 4 は d_8 の成分、つまり脚の上部の厚さに負の相関があることがわかる。

5 3つの性能を考慮した変位拡大機構の設計

古谷らの研究によって求められた最適解を図9の左側に示す^[8]。これは固有振動数と出力変位だけでなく、ミーゼス応力も制約に加えることで、3つの性能全てを考慮しているため、この2目的関数空間で見ると性能が低く見える。

一方、右側に示した形状は、応力についても試験的に考慮した多目的PSOによって、著者らが求めたPareto解の一つである。この形状は、足首が太いが、脚は細く、左図の最適形状とは大きく異なっている。しかし、この形状であっても変位要求を満足しながらも固有振動数が高く、変位拡大機構に適用可能である。

そうすると、他にも適用可能な形状が存在する可能性がある。つまり、今後、この3目的の定式化による多目的最適化を通して、変位拡大機構として適用可能な形状を詳細に探索する価値があると言える。

6 まとめと今後の課題

本研究では、変位拡大機構に対して2目的最適化を行い、Pareto解を得た。そして、このPareto解に対して、k-means法によってデータ分析を行い、4つのクラスターに分類できることを示した。さらに、主成分分析によってクラスターごとの設計変数の特徴を明らかにすることができた。

今回は固有振動数と変位量だけに着目して解を得たが、今後は、応力を目的関数に加えた3目的最適化を行ない、詳細に探索することで、変位拡大機構の形状に対する可能性を広げていく。

参考文献

- [1] 田中宏明, 坂本啓, 石村康生, 稲垣章弥, 小木曾望, 池田忠繁, 古谷寛, 渡辺和樹, 及川祐, 倉富剛, 高精度スマート形状可変鏡試作モデルの開発, 第29回宇宙・構造材料シンポジウム, (2013), A13.
- [2] Tanaka, H., Sakamoto, H., Inagaki, A., Ishimura, K., Doi, A., Kono, Y., Oyama, T., Watanabe, K., Oikawa, Y., Kuratomi, T., Development of a smart reconfigurable reflector prototype for an extremely high-frequency antenna, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, issue 6, (2016), pp. 764–773.
- [3] Kogiso, N., Furutani, T., Naka, K., Kimura, H., Tanaka, H., Iwasa, T., Optimum structural design for high-precision space smart reflector, *12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, (2017), p. 261.
- [4] 古谷直也, 小木曾望, 田中宏明, 変位拡大機構の形状最適設計と設計変数の選択について, 第57回構造強度に関する講演会, (2015), 1A08.
- [5] Ito, M., Kim, N. H., Kogiso, N., Conservative reliability index for epistemic uncertainty in reliability-based design optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, (2018), 57:1919–1935.
- [6] Howell, Larry, L., *Compliant Mechanisms*, Wiley, (2001).
- [7] MacQueen, J., Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations, In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. 1, University of California Press, (1967), pp. 281–297.

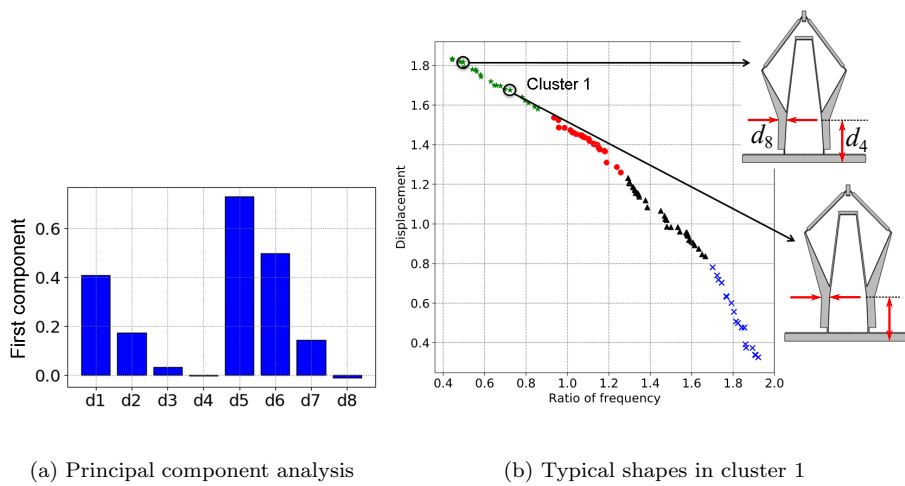


Fig. 5: Characterized cluster 1 by using principal component analysis and one of the configure in cluster 1

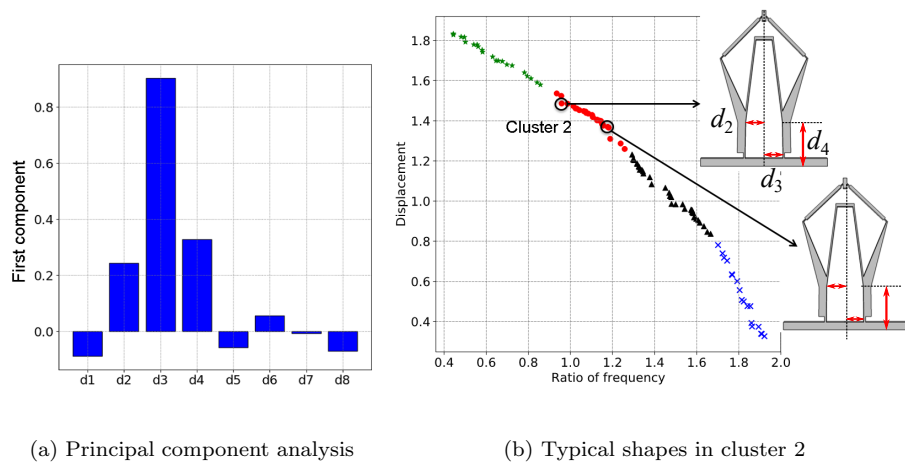


Fig. 6: Characterized cluster 2 by using principal component analysis and one of the configure in cluster 2

- [8] 古谷直也, 小木曾望, 田中宏明, 多目的最適設計法
 を利用した変位拡大機構のトレードオフ解析, 第
 60 回宇宙科学技術連合講演会, (2016), 3H08.

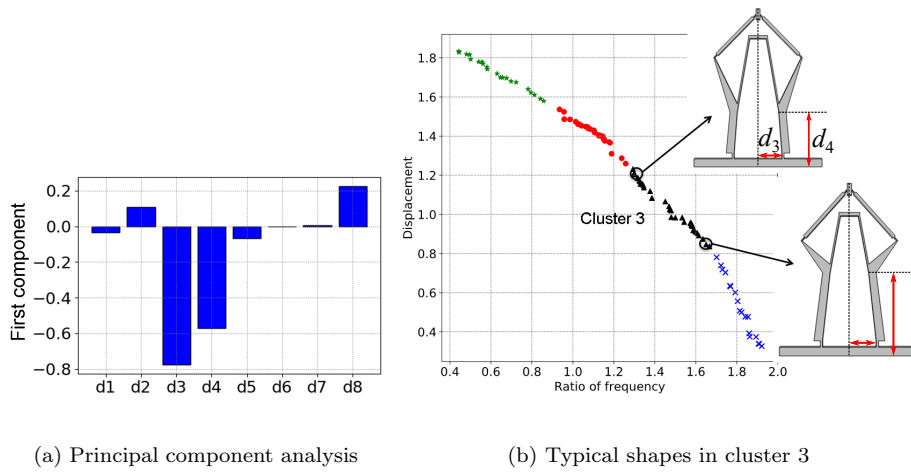


Fig. 7: Characterized cluster 3 by using principal component analysis and one of the configure in cluster 3

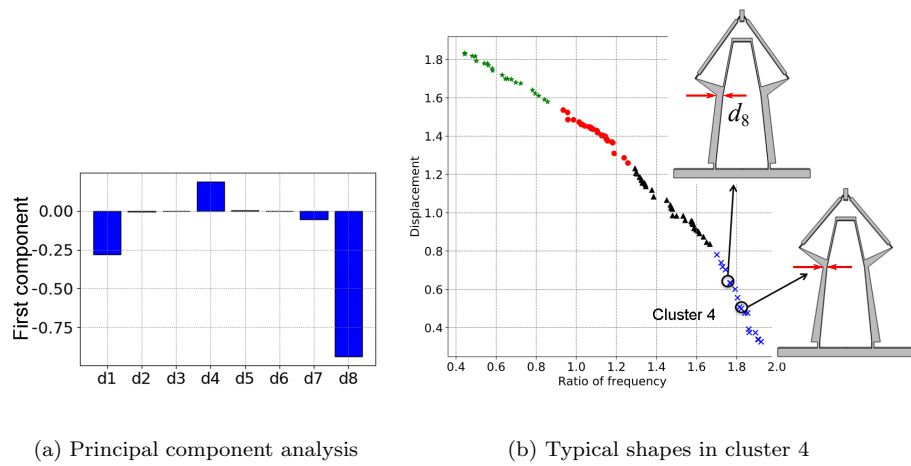


Fig. 8: Characterized cluster 4 by using principal component analysis and one of the configure in cluster 4

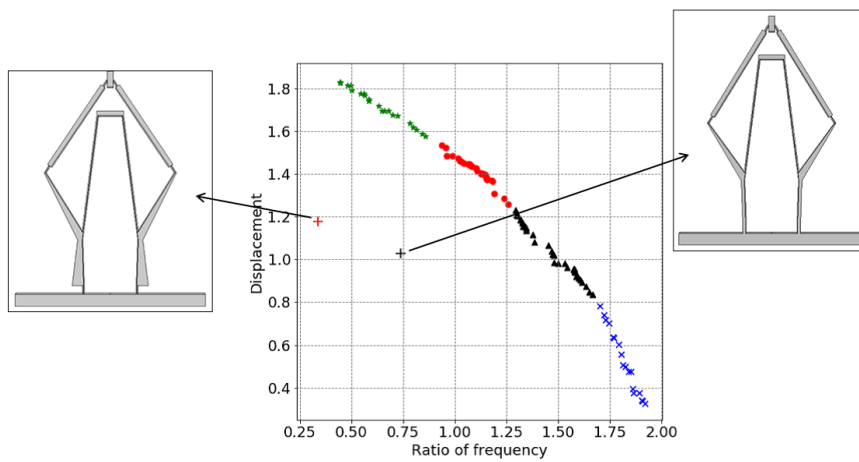


Fig. 9: DMS from the past studies