特異姿勢における自由度の拡張を利用して ヒンジを再配置できる空間4節リンク機構の設計*

大 室 健^{*1}, 森 田 寿 郎^{*2}

Spatial Quadric Mechanism Design for Hinge Relocation Using Extension of DOF in Singular Configuration

Takeshi OMURO^{*3} and Toshio MORITA

^{*3} Graduate School of Science and Technology, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Movable structures can change their shape because each of the components are connected by hinges. This paper discussed a mechanism design method that can relocate hinges based on a four-bar linkage mechanism. In this paper, “structural fabric” is defined as the arrangement of the hinges, and “shape” is also defined as the structural externals made from the arrangement of the hinges. By this definition, changes of the shape by the hinge’s angle without changing the hinge arrangement is different from changes in the structural fabric. On the other hand, origami can transform by changing its structural fabric because it can freely relocate creases as hinges. However, there have been no rigid body structures that have origami-like characteristics, since there has been no mechanism that can relocate hinges. So we have designed HDRM (Hinge Double Relocation Mechanism) which can relocate hinges, and have constructed movable structures by combining the HDRM. Contents of this paper is as follows; First, a mechanism design requirement that can relocate hinges by the planar linkage have became clear. The design requirement has been expanded to spatial linkage mechanisms which have been named HRM (Hinge Relocation Mechanism), through the mechanical analysis of the spherical quadric crank chain mechanism. Next, the HDRM that relocates hinges in a singular configuration has been invented by adapting the mentioned requirement. The requirement of making movable structures from HDRM has been cleared by solving the Hamiltonian path problem. Finally, from evaluations using kinematical and interference analysis on the 3D-CAD, it has been confirmed that the constructed movable structures can change into various shapes by changing the structural fabric.

Key Words: Movable Structure, Hinge Relocation Mechanism, Spatial Linkage Mechanism, Spherical Quadric Crank Chain Mechanism, Singular Configuration, Mechanism Analysis, Extension of DOF, Origami

1. 緒 言

人工的な構造物は一度つくられてしまうと形状が変わらないものが多い。一方、可動構造物はヒンジによって要素を連結することで、形状を変えられる構造物である。

可動構造物を目的で大きく分類すれば展開構造と折り畳み構造に分けられる。展開構造とは収納状態から大きく広がることを目的とした構造であり、折り畳み構造は展開・収納状態を使い分けることを目的とした構造である。可動構造物には蛇腹構造や適応構造⁽¹⁾などがある。これらは伸縮した後に全体を曲げることで形状を使い分けることから、展開・収納状態以外の状態も持つ折り畳み構造とみなせる。これらの展開構

造や折り畳み構造は主に面材や棒材で構成される。

展開構造の例として、人工衛星のソーラーパネルやソーラーセイルが挙げられる。ソーラーセイルでは直径100m級の大規模構造物も想定し、膜面に折り目をつけておき遠心力で展開させるための膜面展開構造が考案されている⁽²⁾⁽³⁾。これらは折り目の研究であり、平面的に広がる2次元展開構造だけでなく、3次元に展開する折り目も開発されている⁽⁴⁾。

折り畳み構造の例には人工衛星の通信システム用アンテナに入れ子式のパイプを用いた形状可変トラス⁽⁵⁾がある。このトラスは各節の長さを調節することによって、収納・展開すること、および展開状態でのトラス構造全体を任意に曲げることができる。また、収納・展開に折り目を利用したものとしてミウラ折り⁽⁶⁾がある。ミウラ折りは一軸方向に伸縮することで開閉ができる折り方であり、地図の折り方として有名である。

これらの可動構造物に共通するのは、ヒンジの配置

* 原稿受付 2009年11月13日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学大学院理工学研究科(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 慶應義塾大学理工学部。

E-mail: runset@z6.keio.jp

を変えずにヒンジの開き角によって形状を変化させていることである。ヒンジの配置状態を構造とし、その配置状態から成る見た目を形状とするならば、前述した可動構造物は構造を変えずに形状を変化させていると言える。

これに対して、構造を変えて形状を変化させる可動構造物として折り紙がある。折り紙は一枚の紙が折り目によって折鶴や兜、飛行機にもなる。さらに、前述したソーラーセイルやミウラ折りも折り紙となり、折り紙で作り得る構造のひとつと言える。

このように整理したとき、折り紙は折り目がヒンジの役割をし、物理的な切り離し・接続を行わなくても、折り目を変えることで構造を自由に換えられる可動構造物であると理解できる。しかし、この折り紙の特徴を剛体による一つの構造物に持たせた研究例は著者らの調べたかぎり存在しない。これは折り紙のように自由にヒンジを再配置できる機構がないためである。

そこで本研究では、4節リンク機構をもとにヒンジを再配置できる機構と、この機構を組み合わせた可動構造物を作り、構造物の状態ヒンジを再配置する設計条件を明らかにした。

まず平面リンク機構でヒンジを切り換えるような動きをするものを参考に、空間リンク機構の機構解析によってヒンジを切り換えるための設計条件を導出した。次にこの設計条件を満たす、特異姿勢においてヒンジを切り換えられる機構を考案し、これを複数組み合わせることで可動構造物を作る設計条件を導いた。そしてこの可動構造物がヒンジの配置を変えることで構造を変化させ、複数の形状になることを3D-CADの機構解析および干渉解析で確認した。

2. ヒンジ再配置可能な リンク機構の設計条件

2.1 平面4節リンク機構によるヒンジ再配置

目標とするヒンジ配置を変えられる可動構造物のイメージを図1に示す。各プレートのヒンジによる接続状態を図1(a)(b)の①に示す。太線で表された部分がヒンジの初期位置であり、各プレート間はヒンジで折ることができる。図1(a)では①で谷折りすると②になる。②において①で用いていた初期ヒンジが自動的に切り離されて、両端のプレートにヒンジを再配置できれば、その後再配置したヒンジを回転させることで③のループ状の形状になる。図1(b)も同様の初期ヒンジ配置からはじめ、①で両端から内側に押し込み②にする。なお、説明のため一部のプレートを透過している。さらに手前の4枚を山折りし、③の状態から底

Fig. 1 Transformation image

Fig. 2 Movement of Cross-link mechanism

面のヒンジに切り換えて左右に開く。そうすることで④の状態になり、最終的に⑥のベンチのような形状になる。

このようにヒンジを自動的に切り換えて再配置する機構があれば、図1(a)(b)のように構造を変化させることができる。

そこでまず、リンク機構の中でヒンジが切り換わるような動作をするクロスリンク機構に注目した。クロスリンク機構は4節リンク機構の一種で図2のような動きをし、リンク C_1D_1 はリンク C_2D_2 、リンク C_3D_3 、リンク C_nD_n の位置に移動できる。このとき、図中に示した瞬間中心が静止節 AB から見て左右に切り換わっている。これを点 A、点 B でヒンジを切り換えるように利用するためには、点 A と点 C_n 、点 B と点 D_n が一致する必要がある、それにはリンク長が全て等しければ良い。このとき、4節リンク機構として成り立つかどうかを確認する必要がある。4節リンク機構が回転する条件としてはグラスホフの定理が知られており、図2のクロスリンク機構では各リンク長が以下の条件のとき原動節 AD_n が回転する。

$$\overline{C_n D_n} + \overline{D_n A} \leq \overline{AB} + \overline{C_1 B} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\overline{C_n D_n} + \overline{AB} \leq \overline{D_n A} + \overline{C_n B} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\overline{C_n D_n} + \overline{C_n B} \leq \overline{AB} + \overline{D_n A} \quad \dots\dots\dots (3)$$

これらの式より、すべてのリンク長が等しくてもグラスホフの定理を満たすので原動節は回転することが確認できる。つまり全てのリンク長が等しく、点Aと点C_n、点Bと点D_nが一致するとき、静止節ABと中間節C_nD_nが重なった状態で点Aまわりに回転する。また、中間節C_nD_nは原動節AD_nと重なって点Bまわりにも回転できる。このことは、ヒンジが静止節ABの両端にあることと同等であり、ヒンジの再配置ができる機構になっていると言える。

2.2 空間リンク機構によるヒンジ再配置

2.2.1 球面4節リンク機構 前節で平面上においてヒンジを再配置する機構ができた。しかし、図1のイメージ図ではヒンジの切り換えは空間上で行われており、平面機構である2.1節のクロスリンク機構では実現不可能である。よって空間機構でクロスリンク機構と同様の効果を持つものを見つける。クロスリンク機構では全てのリンク長が等しいことがヒンジの再配置の条件であり、空間機構でヒンジの再配置の特徴を持つものとして図3の球面4節リンク機構が候補となる。

通常、空間4節リンク機構は全て1自由度の回り対偶で構成すると自由度を失って動かないが、Bennettの機構⁽⁸⁾や球面4節リンク機構は例外的に機構として成り立つことが知られており、自由度を拡張している機構と言える。なお、自由度の拡張とは、図4(a)

Fig. 3 Spherical quadric crank chain mechanism⁽⁷⁾

Fig. 4 Extension of degree of freedom by link arrangement

のように2対偶のリンクを5つ連結すると、計算上は自由度が0になるが、(b)の平行リンクのように特殊な状態では自由度が1に拡張されることである。球面4節リンク機構は各対偶の中心線が球の中心を通るため、計算上の自由度が0でも自由度の拡張によって機構として成り立つ。

ヒンジ再配置が可能なクロスリンク機構は、図2の点A、点Bにおいてそれぞれ自由度を持つ。このことを自由度を拡張していると捉えれば、クロスリンク機構と球面4節リンク機構は同様の特徴を持つと言える。また、前述の通り球面4節リンク機構の対偶の軸線は球の中心を通るため、機構解析上のリンク長は0で全て等しい。これらの点において、ヒンジ再配置できるクロスリンク機構と球面4節リンク機構は共通の特徴を持つと言える。

以上の理由から、球面4節リンク機構の解析を行うことで、空間内のヒンジ再配置を実現するための設計条件を導くことにした。

2.2.2 空間4節リンク機構の解析手法 空間機構の解析手法として、ベクトル方程式を用いるもの⁽⁹⁾と、Denavit-Hartenberg法⁽¹⁰⁾、Ogawaの手法⁽¹¹⁾がある。本稿では各リンク間の角度等のパラメータによって、ヒンジ再配置の条件を表すことを目指して、機構の本質を理解しやすいOgawaの手法を用いた。以下に解析手法を解説する。

図5のように固定座標系Σ_Aで表されるO-XYZ上の位置ベクトル^ABの方向余弦を^AB(^AX_B, ^AY_B, ^AZ_B)とし、同様に部材座標系Σ_Bで表されるA-xyz上の位置ベクトル^BBの方向余弦を^BB(^Bx_B, ^By_B, ^Bz_B)とする。Σ_Aに対するΣ_Bの位置ベクトルを^AAとしたとき、^ABは以下のように表せる。

$$\begin{aligned} {}^A B &= {}^A A + {}^B B \\ \begin{bmatrix} {}^A X_B \\ {}^A Y_B \\ {}^A Z_B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} {}^A X_A \\ {}^A Y_A \\ {}^A Z_A \end{bmatrix} + E^{k\theta} E^{i\alpha} \begin{bmatrix} {}^B x_B \\ {}^B y_B \\ {}^B z_B \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

この式(4)を図6のリンク機構に適用すると、 $E^{i\alpha}$,

Fig. 5 Relation between coordinate system Σ_A and Σ_B⁽¹¹⁾

Fig. 6 Correspondence of linkage mechanism and its parameters⁽¹¹⁾

$E^{k\theta}$ はそれぞれ x 軸, z 軸回りの回転変換行列なので部材座標系を表示すると次式になる.

$$\begin{bmatrix} {}^A X_B \\ {}^A Y_B \\ {}^A Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = M_a \begin{bmatrix} {}^B x_B \\ {}^B y_B \\ {}^B z_B \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

ただし, 同次変換行列 M_a の成分は次式で表せる.

$$M_a = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_a \cos \alpha_a & \sin \theta_a \sin \alpha_a & a \cos \theta_a \\ \sin \theta_a & \cos \theta_a \cos \alpha_a & -\cos \theta_a \cos \alpha_a & a \sin \theta_a \\ 0 & \sin \alpha_a & \cos \alpha_a & Z_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$a \cos \theta_a = {}^A X_A, \quad a \sin \theta_a = {}^A Y_A, \quad Z_a = {}^A Z_A$$

式(5)を空間の閉リンク機構, つまり図6の2リンク以降にリンク c, リンク d があり, リンク d はリンク a に連結している状態について適用する. リンク a が対偶 J_{ab} においてリンク b に, リンク b が対偶 J_{bc} においてリンク c に, リンク c が対偶 J_{cd} においてリンク d に順次接続されており, 線分 a は対偶 J_{da} の軸 Z と対偶 J_{ab} の軸 z_{ab} の共通垂線を表す. なお, 各対偶における z 軸は対偶の向きである. この a の長さはリンク a の真のリンク長を表す. これを図7のように書き改めれば, 共通垂線 a が軸 z_{ab} と交わる点が直交座標系の原点 O_{ab} となり, b 以降も同様である. よってリンク b に対する M_b という同次変換行列が定義でき, パラメータは $b, \alpha_b, \theta_b, z_b$ で表される. b の長さはリンク b の真のリンク長, α_b は共通垂線と軸 z_{ab} がなす y_{ab} まわりの角度でリンク間のねじれ角, θ_b はリンク a とリンク b の角度, z_b はリンク間のオフセット量である. 各リンクの関係を理解しやすくするため, リンク b に対するリンク c の接続関係を図8

Fig. 7 Definition of linkage mechanism's coordinate system⁽¹¹⁾

Fig. 8 Notational system of link b link c⁽¹¹⁾

Fig. 9 Definition of spherical quadric crank chain mechanism⁽¹¹⁾

Fig. 10 Connection diagram of spherical quadric crank chain mechanism⁽¹¹⁾

のように表す.

2・2・3 球面4節リンク機構の解析 球面4節リンク機構は, 前述したように全ての回り対偶が球の中心を通る機構であるため, 座標軸の取り方は図9のように定められる. 2・2・1項で述べたように, 図9から各対偶間の距離である真のリンク長は全て0で中心に集まっているため, 前述のとおり機構の運動は中心角に依存することがわかる. なお, 各リンクの接続関係は図10のように表せる. この図から, 各節の M の間には次の関係が成立する必要がある.

$$M_a \times M_b \times M_c \times M_d = I \dots\dots\dots (6)$$

I は単位行列であり, この式は球面4節リンク機構が閉リンク構造であるから, 最後のリンク先端が原点に戻っていることを示している.

これを Ogawa の記号方程式で表示すれば式(7)となる。

$$J_{da} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_a \\ \theta_a \\ 0 \end{bmatrix} J_{ab} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_b \\ \theta_b \\ 0 \end{bmatrix} J_{bc} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_c \\ \theta_c \\ 0 \end{bmatrix} J_{cd} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_d \\ \theta_d \\ 0 \end{bmatrix} = I \dots\dots\dots (7)$$

球面4節リンク機構に特異な状態があるとすれば、それぞれの中心角 α_n の関係によるものである。クロスリンクで全てのリンク長が等しいときには、図2の静止節 AB と中間節 $C_n D_n$ が重なった状態と、中間節 $C_n D_n$ と原動節 $A D_n$ が重なった状態を作れるため、ヒンジ再配置が可能になる。これと同じ状態を作るには、図9の静止節を a, 原動節を b, 中間節を c, 従動節を d としたとき、静止節 a と中間節 c, 中間節 c と原動節 b が重なる状態を作ればよいと言える。この条件を満たすには $\alpha_a \sim \alpha_d$ が全て $\pi/2$ であれば良い。その記号方程式は式(8)になる。

$$J_{da} \begin{bmatrix} 0 \\ \pi/2 \\ \theta_a \\ 0 \end{bmatrix} J_{ab} \begin{bmatrix} 0 \\ \pi/2 \\ \theta_b \\ 0 \end{bmatrix} J_{bc} \begin{bmatrix} 0 \\ \pi/2 \\ \theta_c \\ 0 \end{bmatrix} J_{cd} \begin{bmatrix} 0 \\ \pi/2 \\ \theta_d \\ 0 \end{bmatrix} = I \dots\dots\dots (8)$$

この式を回転行列で表現すると式(9)になる。なお、簡略化のため $\cos \theta_a$ は C_a , $\sin \theta_a$ は S_a と表記している。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_a & 0 & S_a \\ 0 & S_a & 0 & -C_a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_b & 0 & S_b \\ 0 & S_b & 0 & -C_b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_c & 0 & S_c \\ 0 & S_c & 0 & -C_c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_d & 0 & S_d \\ 0 & S_d & 0 & -C_d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

この結果を用いると、式(6)は以下のように書き換えることができる。

$$M_b \times M_c \times M_d = M_a^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_b C_c C_d + S_b S_d & C_b S_c & C_b C_c S_d - S_b C_d \\ 0 & S_b C_c C_d - C_b S_d & S_b S_c & S_b C_c S_d + C_b C_d \\ 0 & S_c C_d & -C_c & S_c S_d \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_a & S_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & S_a & -C_a & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)の左辺と右辺を比べることで9個の方程式が得られるので、 θ_a すなわち軸 x_{ab} が x_{da} に対する回転角を入力角とすれば、他の角は

$$\tan \theta_b = 0, \quad \cos \theta_c = \cos \theta_a, \quad \tan \theta_d = 0 \dots\dots\dots (11)$$

で表される。この結果は図3の球面4節リンク機構において原動節 b および従動節 d が、それぞれ静止節 a, 中間節 c に対して動かない状態、つまりリンク a とリンク b, リンク c とリンク d がそれぞれ重なっていることを示しており、特異な状態だと言える。また、リンク a とリンク c は同じ角度をとることから、リンク a, リンク c 間の角度のみを変化できることがわかり、これはクロスリンク機構のヒンジ再配置の動きと一致する。よって、球面4節リンク機構で中心角を全て $\pi/2$ にすることが、空間内でヒンジ再配置が行える条件だと言える。

3. ヒンジ再配置機構の考案

3・1 クロスリンク型ヒンジ切換機構 2・1節のクロスリンク機構の全てのリンク長を同じにした、クロスリンク型ヒンジ切換機構(Cross-link type Hinge Relocation Mechanism: CHRM)を図11, 12に示す。図中のプレート A, B がそれぞれ図2のリンク

Fig. 11 Cross-link type Hinge Relocation Mechanism

Fig. 12 Rotation axis switching of CHRM

AB とリンク C_nD_n に相当する。図 12(a) の閉じた状態から、図 12(b)(c) のように、見かけのヒンジである回転軸 a および回転軸 b で開くことによって、2 つのヒンジを再配置する動きができる機構である。

図 2 の全てのリンク長を同じにして、リンク C_nD_n を点 A 回りに動かしたときに対応するのが図 12(b) であり、点 B 回りに動かしたときに対応するのが図 12(c) にあたる。このとき図 2 のリンク AB、リンク C_nD_n に可動域の制限がないと点 A または点 B で回転し続けて、リンク AD_n かリンク C_nB の一方が動かない状態になる。これは機構的には常に死点の状態にあると言える。動かないリンクを変えるためには、どちらのリンクも死点で動かない状態においてヒンジを A 点から B 点に切り換える必要がある。その状態とは全てのリンクが重なる瞬間であり、この姿勢を特異姿勢とした。よって、図 11 の CHRM では、図 2 のリンク AB とリンク C_nD_n をプレート A、B に置き換えることで特異姿勢において回転を抑制し、折り畳むことによる自動的なヒンジ再配置を可能にした。このときヒンジ再配置を目的とするため、プレートは辺同士が接続するようにプレートを配置することとし、斜めには配置できないものとする。

なお、これと同じ機構が著者らと別のグループによって実用新案申請中であることを紹介しておく。

3.2 ヒンジ切換可能な空間機構 空間機構のヒンジ切換機構(Hinge Relocation Mechanism: HRM)を図 13 に示す。球面 4 節リンク機構を用いて、2・2・3 項で導いた中心角を全て $\pi/2$ にするという設計

Fig. 13 Over view of Hinge Relocation Mechanism

Fig. 14 Definition of HRM parameters

条件を満たすようにした。図 14 と図 9 を対応させれば、真のリンク長がすべて 0 で、軸が中心に集まっていることが確認できる。また、3・1 節のクロスリンク型のものと同様に、斜めにプレートを配置することは無いものとする。HRM でも全てのリンクが重なるところでヒンジ再配置を行うため、クロスリンク型と同様にプレートをを用いることで特異姿勢における回転を抑制している。図 3 と図 14 のリンク a, b, c, d はそれぞれが対応しており、リンク a, c をプレートにしたのがわかる。よって、プレート A を透過した図 13(a) に示すように回転関節 #1 と #2, #3 と #4 はプレート A, B にそれぞれ接続し、リンク A, B の端点は、回転関節 #1 と #3, #2 と #4 にそれぞれ接続している。図 15(a) の折り畳んだ状態では、図 13(b) のように回転関節 #1 と #4, #2 と #3 がそれぞれプレート上の 2 つの同軸上に並ぶため、この状態では回転軸 a, b が同時に存在する。このとき軸 a で開けば図 15(b), 軸 b で開けば図 15(c) になり、プレート B に対する回転軸が切り換わっていることがわかる。

以上より、ヒンジ再配置条件を満たす空間 4 節リンク機構ができたと言える。

3.3 ヒンジ二重切換機構 図 1(a)②と図 1(b)②でヒンジを再配置するとき、それぞれ谷折り、山折りで折り畳んで切り換えている。3・2 節の HRM を用いる場合、HRM は谷折りでしか切り換えができないため、図 1 の可動構造物を作ったときに不都合がある。そこで谷折りでも山折りでもヒンジ再配置を可能にするため、HRM の裏面にもリンクを配置した機構を考案した。

HRM を裏表に組み合わせたヒンジ二重切換機構(Hinge Double Relocation Mechanism: HDRM)を図 16 に示す。破線で表したリンクはプレートの裏面に配置されたリンクで、回転関節 #2 にはリンク b と c, #3 にはリンク a と d が接続されており、色の異なる #2, #3 の回転関節はどちらのプレートにも固定されていない。また、図 17 の左側面図に示すように回転

Fig. 15 Rotation axis switching of HRM

Fig. 16 Overview of Hinge Double Relocation Mechanism

Fig. 17 Left side view of HDRM in open state

Fig. 18 Rotation axis switching of HDRM

関節#3はプレートに固定されていないため、軸 a_1 で表側に、軸 a_2 で裏側に折りたためるようになっている。なお、回転関節#3についても同様である。HDRMはプレートAとBを、図17の軸 a_1 で①の方向に折ると図18に示すように、プレートAから見た関節が軸 a から軸 b に、軸 a_2 で②の方向に折ると同様に軸 a から軸 c に切り換えられる。すなわちHDRMは3つの回転軸を切り換えられ、可動構造物を組むときに多彩なヒンジ再配置が期待できる。

3.4 空間機構のヒンジ再配置条件 前節まででHRMができたことより、2.2.3項の球面4節リンク機構の全ての中心角を $\pi/2$ にすることが、空間内でヒンジ再配置を可能とする切換機構を構成する条件であることが確認できた。さらに切り換えられる軸を増やしたい場合は、HRMを組み合わせて新たな2プレートの機構を作れば良いと言える。

4. HDRMによる可動構造物の構築

4.1 HDRMによる構築条件

4.1.1 ヒンジ切換機構の組み合わせ 前節まででヒンジ再配置が可能な機構ができたため、図1のヒンジ部分をHDRMで構成すれば可動構造物ができると考えられる。説明の手順として、まず図16のHDRMに図13(a)に示したHRMを追加する。図19(a)においてHDRMにプレートCを追加し、

(a) HDRM+HRM (b) HDRM+HDRM

Fig. 19 Combination of HDRM

HRMを組み込んだ。実線で囲まれたプレートAとB、リンクa~dがHDRMであり、破線で囲まれたプレートAとC、リンクeとfがHRMである。このようにプレートAをHDRMとHRMで共有しても、リンクaとリンクeが干渉せずに配置でき、HDRMとHRMを組み合わせることが容易であることがわかる。

次にHDRM同士を組み合わせる。図19(a)のプレートA、Cで構成されるHRMの裏側にHRMを配置すれば、3.3節に記したようにHDRMになるため、図19(b)のようになる。裏側のHRMはリンクcと追加されたリンクgで構成されており、表側のHRMと合わせれば破線で囲まれたプレートAとC、リンクcとe~gによってHDRMが構成されていることがわかる。結果的にリンクcは実線で囲ったプレートA、BによるHDRMと共有し、一本にできる。このようにHDRM同士の組み合わせも容易であることが確認できた。

4.1.2 HDRMの組み合わせ条件 前項より、HDRMは複数組み合わせられることがわかった。さらに2つ組み合わせたとときと同様に、4つのHDRMを組み合わせると図20のようになる。プレートAとB、プレートBとC、プレートCとD、プレートDとAの全てがHDRMになっており、このとき回転軸1, 2で回転することができる。このように組み合わせることで全ての辺で切り換えが可能になっており、プレートAの左右と下の辺はAとBのHDRMによって、左と上下の辺はAとDのHDRMによってそれぞれ切り換えができる。全てのプレートをHDRMで接続することで全体が閉ループ構造になれば、全てのプレートが全ての辺で切り換えが可能となることから、本研究ではHDRMで閉ループ構造を構築する。

プレートを増やしたときに、HDRMの組み合わせが複雑になり、試行錯誤による解探索が困難になると予想されるため、組み合わせ条件を見つけておく。HDRMの組み合わせを簡易化して表記するため、図20の構造物を図21のようにグラフ理論⁽¹²⁾の表記を

Fig. 20 4 plates movable structure using HDRM

Fig. 21 Hamiltonian path of 4 plates structure

(a) Hamilton path

(b) Linkage arrangement

Fig. 22 8 plates movable structure using HDRM

用い、プレートの中心を頂点(vertex), HDRM による接続を枝(branch)として置き換えた。図 21 より、全てのプレートを HDRM で連結すると、前述したように閉ループ構造になっていることがわかる。よってこの構造物は以下の条件で構築されている。

- ・全体が閉ループ構造である。
- ・各プレートは1つの HDRM で連結している。

これはグラフ理論において全ての頂点を一度だけ通る閉路が存在するかを調べる問題となり、ハミルトン閉路問題⁽¹²⁾と呼ばれる。つまり、本研究における HDRM の組み合わせ条件は、ハミルトン閉路が存在するプレート配置になっている必要があることである。

4・1・3 可動構造物のリンク配置方法 4・1・2 項で組み合わせ条件を決定したので、4 プレート以外の構造物について考える。今回は8プレートについての結果を示す。図 22(a)のようなプレート配置の場合、図中のようなハミルトン閉路が存在する。なお、HDRM で接続されているプレートを分かりやすくするため、各辺に太線を追加した。そしてハミルトン閉路に沿って4・1・1 項と同様に HDRM の組み合わせを考えれば、図 22(b)のようなリンク配置が得られる。

4・2 HDRM による可動構造物 HDRM を組み合わせられることは確認できたが、図 20 のような構造モデルを作ると回転軸 1, 2 で折り畳んだときに、HDRM のリンクを連結している回転関節が干渉して、完全に折り畳むことができない。HDRM は完全に折り畳んで特異姿勢にしないとヒンジの切り換えができ

Fig. 23 Revolute joint arrangement of 4 plates movable structure

Fig. 24 No interference with revolute joint in 4 plates movable structure

ないため、これを解決する必要がある。

その方法として、2 章で示した球面 4 節リンク機構が中心角のみで運動が決定する特徴を用いる。すなわち、中心角の $\pi/2$ さえ保てばリンクの形状は任意なため、プレートごとに回転関節の位置をずらす。回転関節の位置を考えるため、HDRM による構造物の回転関節とリンクを記号化して図 23 に示す。回転軸 1, 2 上にある回転関節については、それぞれの回転軸で折り畳んだ時に干渉するものを、同じ網掛けで表してある。

また、図 24 に折り畳んだ時に干渉のない回転関節の配置例のひとつを示す。回転関節の位置は以下の条件に当てはまるように設計してある。

- [1] 軸 1 および軸 2 で折り畳んだときに、全ての回転関節が干渉しない。
- [2] 回転関節 a, b, c, d は軸 2 で折り畳んだ後、さらに回転軸 1 で折り畳んでも干渉しない。
- [3] 回転関節 e, f, g, h は軸 1 で折り畳んだ後、さらに回転軸 2 で折り畳んでも干渉しない。

[1] が最低限の条件であるのは明らかである。この条件を満たすには、回転軸 1, 2 の鏡面对称の位置に回転関節を設置しなければ良いだけである。

[2][3] は、HDRM のヒンジ再配置による変形過程、もしくは変形後に回転関節が干渉しないための条件である。4・1 節に示したとおり図 23 の構造物は

HDRM で構成しているため、回転軸 1, 2 で折り畳めば回転軸の切り換えが起きる。すなわち回転軸 1 で折り畳んだ図 25 ①において回転関節 A, B が存在する辺から回転関節 a, b が存在する辺、同様に回転関節 C, D が存在する辺から回転関節 c, d が存在する辺への切り換えが起きる。よって図 25 ①では右端の辺に回転軸が存在し、図 1(a)③のような輪になってプレートの位置関係を図 25 ②のようにすることができる。

同様に回転軸 2 で折り畳むと図 25 ③のようになり、回転軸の切り換えにより図 25 ④になる。この構造物では図 25 ①～④の全ての状態で回転関節の干渉が起きないようにすれば良い。それはすなわち、プレートの厚みを無視して回転軸 1 で折り畳んだ後、回転軸 2 で折り畳んだ図 26 の状態で回転関節配置を考えることになる。つまり回転関節 a～d, e～h, A～D, E～H の全てが、それぞれの辺で重ならないように配置し、それをもとに図 24 の開いた状態に対応させて、回転関節に連結するリンクを決定すれば干渉が無い配置になる。

以上より図 24 のヒンジ配置は、変形途中でも回転関節の干渉が起きない一例だと言える。ただし、あく

まで一例であり [1]～[3] の条件を満たす回転関節の配置は他にも存在する。

5. HDRM による可動構造物の検証

HDRM を用いた可動構造物が構造を変化させられるかを確認するために、干渉解析および機構解析を 3D-CAD を用いて行う。構造が変化した後に HDRM の回転関節の干渉が起きないことを確認するためには干渉解析が必要である。また、HDRM のプレートはリンクに連動して姿勢と位置関係が変わるため、可動構造物全体の運動を見るには干渉解析を行いながらの機構解析が必要である。

4・2 節の図 24 を参考に、HDRM のヒンジの干渉を考慮して製作した可動構造物の 3D-CAD モデルを図 27(a)(b)に示す。図 27(a)が表面のリンク配置で、図 27(b)が裏面のリンク配置となっている。なお、プレートの位置関係を分かりやすくするために、各プレートにはアルファベット A～D を掘込んでいる。

このモデルを干渉解析を行いながら動作解析をしたところ、図 28 の①を初期状態として、②～⑤と⑥～⑨のように動いた。図 28 ①をプレート C とプレート D が上になるように谷折りすると②になる。さらに①から②のときに用いたヒンジ(折り目)が再配置されるので、②の矢印方向に回転させると③の状態になる。③の状態からそのまま回転させると④になり、①から②とは逆の手順でヒンジが再配置されて、開くと⑤の状態になる。このとき、①と⑤の状態は同じに見えるが、プレートの位置関係が変わっている。このことから、ヒンジ配置が変わって構造が変化したことは明らかである。

同様に①からプレート A とプレート B が上になるように山折りすると、⑥から⑦のように変形した。初期状態の①から折り畳む方向を変えることで、このように③と⑦という全く異なる形状になることが確認できた。⑦の状態からさらに回転させることにより⑨の

Fig. 25 Revolute joints and plates position by hinge relocation in 4 plates movable structure

Fig. 26 Idea of revolute joint arrangement in 4-plates movable structure

(a) Obverse side

(b) Reverse side

Fig. 27 4 plates movable structure on 3D-CAD

Fig. 28 Transformation patterns of 4 plates movable structure on 3D-CAD

状態になるが、これも①や⑤とはプレート同士を接続する辺が異なる。よって形状は同じだがヒンジ配置が異なるため、これらは異なる構造であると言える。また、全ての変形過程でHDRMのヒンジの干渉は起こらず、この可動構造物が構造上問題ないことが確認できた。

以上より、可動構造物の構造を変化させるためにヒンジの再配置が有効であることと、2・3節で導いた、空間内でヒンジ再配置が行える機構の設計条件が正しいことが確認できた。

6. 結 言

本研究では、可動構造物の構造を変化させるための機構の条件を導くことを目的として以下のことを行った。

- (1) 可動構造物の構造を変化させるために、ヒンジの再配置が有効であることを提案した。
- (2) クロスリンク機構において全てのリンク長を等しくし、特異姿勢における自由度の拡張を利用する

ことが、平面内でヒンジ再配置を可能とする機構の設計条件であることを導いた。

(3) 球面4節リンク機構において全てのリンク間のねじれ角である中心角を $\pi/2$ にすることが、空間内でヒンジ再配置を可能とする機構の設計条件であることを導いた。

(4) 特異姿勢での可動域を抑制することで、平面内のヒンジ再配置を可能にする機構である。クロスリンク型ヒンジ切換機構(CHRM)を考案した。

(5) 空間内のヒンジ再配置を可能とする空間機構である。ヒンジ切換機構(HRM)を考案した。

(6) HRMを2つ組み合わせることで、ヒンジ再配置のパターンを増やしたヒンジ二重切換機構(HDRM)を考案した。

(7) HDRMを組み合わせた構造物の構成条件をハミルトン閉路問題を解くことによって導出し、可動構造物を構築した。

(8) 4プレートの可動構造物において、回転関節の干渉を考慮した回転関節配置を探索した。

(9) HDRMによる可動構造物の3D-CADモデルを作成し、干渉解析と動作解析を同時に行うことで可動構造物として成り立つこと、および可動構造物が構造を変化させることを確認した。

これらの結果から、ヒンジ再配置によって可動構造物の構造に変化を与える空間4節リンク機構の設計条件が、全てのリンク間のねじれ角を $\pi/2$ とすることであるという結論を得た。

文 献

- (1) Miura, K. and Furuya, H., An Adaptive Structure Concept for Future Space Applications, *Collect Tech Pap AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC*, Vol. 26, No. 8 (1988), pp. 995-1002.
- (2) Inoue, Y. and Furuya, H., Tether Deployment Mechanisms of Rotationally Skew Fold Membrane for Spinning Solar Sail, *Proceedings of the Space Sciences and Technology Conference*, Vol. 49 (2005-11), p. 2 C 04.
- (3) Nojima, T., Folding/Wrapping Method of Circular Membranes Easily Deployable, *JSME*, Vol. 70, No. 689 (2004), pp. 251-257.
- (4) Sogame, A. and Furuya, H., Concept of Cylindrical Deployable Space Structures and its Geometrical Properties, *Journal of Architecture and Planning*, No. 527 (2000), pp. 149-154.
- (5) Hanahara, K. and Tada, Y., Statically Indeterminate Adaptive Truss with Wire Member Actuators (Topology Design and Kinematics), *JSME*, Vol. 66, No. 642 (2000), pp. 539-544.
- (6) Tanizawa, K. and Miura, K., Large Displacement Configurations of Bi-Axially Compressed Infinite Plate, *Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Transactions*, Vol. 20, No. 50 (1978), pp. 177-187.

- (7) Artbolevisky, I. I., *Mechanisms in Modern Engineering Design*, Japanese ed., (1985), p. 100, Gendaikohgakusha Publishing Co., Ltd.
 - (8) Bennett, G. T., *A New Mechanism, Engineering*, Vol. 76 (1903), p. 777.
 - (9) Makino, H., *Automatic Machine Mechanism Study*, (2005), pp. 277-282, Nikkan Kogyo Shimbun Co., Ltd.
 - (10) Denavit, J. and Hartenberg, R. S., A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 22 (1955), pp. 215-221.
 - (11) Ogawa, K., Three-Dimensional Linkage Mechanisms, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 32, No. 12 (1960), pp. 805-811.
 - (12) Fujishige, S., *Graph Network and Combinatorial Analysis*, (2002), Kyoritsu Publishing Co., Ltd.
-