

메쉬 안테나의 전개 구조물 설계 및 다물체 동역학 해석

노진호^{1,†}, 정화영², 강덕수², 강정민², 윤지현²¹항공우주 및 기계공학부, 한국항공대학교²C41STAR 기계융합연구소, LIG넥스원

Multibody Dynamic Model and Deployment Analysis of Mesh Antennas

Jin-Ho Roh^{1,†}, Hwa-Young Jung², Deok-Soo Kang², Jeong-Min Kang², and Ji-Hyeon Yun²¹School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University²Mechanical R&D (Space System), LIG Nex1

Abstract

The purpose of this paper was to understand the dynamics of deployment of large mesh antennas, and to provide a numerical method for determining the dynamic stiffness and the driving forces for the design. The deployment structure was numerically modeled using the frame elements. The eigenvalue analysis was demonstrated, with respect to the folded and unfolded configurations of the antenna. A multibody dynamic model was formulated with Kane's equation, and simulated using the pseudo upper triangular decomposition (PUTD) method for resolving the constrained problem. Based on the multibody model, the kinetics of the deployment, the motor driving forces, and the feasibility of the designed deployment structure were investigated.

초 록

본 논문에서는 전개형 메쉬 안테나의 동적 강성 설계 및 다물체 동역학을 이용한 요구되는 구동력 및 전개 특성을 분석하고자 한다. 프레임(frame) 요소를 이용하여 전개 구조물을 모델링한다. 다각(polygon) 형상 전개 구조물의 전개/수납된 형상에 따른 고유치 문제를 분석하였다. Kane's 방정식을 이용하여 전개 구조물의 다물체 동역학 방정식을 유도하고 PUTD(pseudo upper triangular decomposition) 방법을 적용하여 구속조건 문제를 해결하였다. 고유진동 해석 및 다물체 동역학 시뮬레이션을 통해 설계된 전개형 구조의 구조 동특성 및 실현성을 살펴보고자 한다.

Key Words : Deployable Reflector Antenna (전개형 반사판 안테나), Multibody Dynamics(다물체 동역학), Kane's Equation(Kane's 방정식), PUTD(Pseudo Upper Triangular Decomposition)

1. 서 론

대형 안테나는 미래의 고성능 위성, 통신중계 시스템, 지구 관측 및 심우주 탐사에 필수적인 기술이다. 대형 안테나는 발사체 수납공간에 적합하도록 소형으로 수납된 후, 우주 궤도에서 정해진 형상으로 펼쳐질 수 있는 전개형 구조로 개발되고 있다 [1, 2].

유연한 케이블 넷(net)의 초기 장력을 이용해 안테나 형상을 유지시켜주는 전개형 안테나는 높은 수납

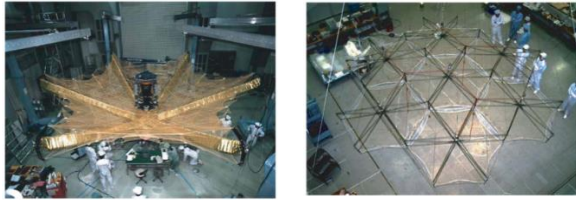
성과 구조 경량 특성 때문에 우주안테나 개발에 많이 적용되고 있다. 1990년 Miura는 대형 전개형 반사판 안테나의 높은 형상 정확도를 위해 Tension-truss 개념을 제안하였다 [3]. 파라볼라(parabolic) 반사판 표면은 여러 삼각 트러스 구조들로 만들어, 쉽게 수납되어질 수 있도록 하였다. Tension-truss 안테나의 주요 장점은 구조 부재 개수 증가 없이 삼각 트러스 구조의 크기 조절을 통하여, 표면형상 정확도를 높일 수 있는 것이다. Figure 1은 중앙 허브에서 6 개 트러스 기둥들(masts)에 의해 tension-truss가 전개되어지는 8 m 지름의 Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy (HALCA) 안테나 그리고 4.8 m 지름의 육각형 모듈(module) 14개를 이용

Received: Apr. 20, 2022 Revised: May 17, 2022 Accepted: May 24, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0289, E-mail: jinhoroh@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering



(a) HALCA (by ISAS) (b) ETS VII (by NASDA)
Fig. 1 Deployable Tension-truss Antennas

하여 13 m 반사판을 가지는 Engineering Test Satellite(ETS) VIII 안테나를 보여주고 있다.

폐곡선을 갖는 다각(polygon) 형상의 전개형 트러스 안테나는 구조물의 전개 동기화(synchronization), 우수한 열적 안정성 그리고 높은 전개 신뢰성을 가지고 있어, 우주 안테나 연구에 많은 연구가 수행되어왔다. 1980년대 초기부터 옛 소련(Soviet Union)은 Georgian Technical University (GTU)에 우주프로그램을 신설하여, 팬터그래프(pantograph)를 이용한 우주 전개 구조물 개념 연구를 진행하였고 [4, 5], 1999년 Mir 우주정거장에서 5.5 m 지름의 반사판 안테나 전개시험을 성공했다 (Fig. 2).



Fig. 2 Deployable Reflector at the Mir Station

TRW Astro Aerospace는 현재 최고기술 수준의 대형 전개 반사판 안테나 AstroMesh를 개발하였다 [6]. AstroMesh는 케이블 네트워크(networks)가 전개형 트러스 구조에 부착되어 있는 형태이다 (Fig. 3). 수직 방향의 보조(auxiliary) 케이블의 인장력을 조절하여 파라볼라메쉬 반사판 형상을 유지하게 한다. 6 m 그리고 12 m 지름을 갖는 AstroMesh가 개발되었다. ESA에서는 Large European Antenna(LEA) 프로젝트를 진행하고 있으며, 6 m 전개형 메쉬 반사판 안테나를 개발하였다 (Fig. 4).

우주궤도에서 위성 임무 수행 동안, 안테나 반사판은 위성의 자세제어 기동에 가진(excitation)되지 않도록,

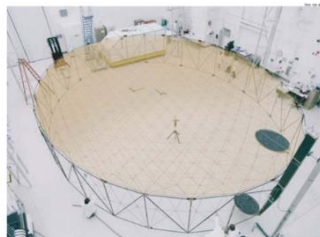


Fig. 3 AstroMesh™

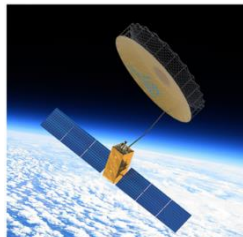


Fig. 4 LEA

록, 동역학적 강성(stiffness)을 가져야 한다. 따라서, 1차 고유진동수 및 진동모드는 중요한 안테나 설계요소이다 [7]. 안테나의 반사판 크기가 커질수록 구조물의 유연도는 증가된다. 구조물의 변형이 커지게 되면, 전개 시스템은 1 자유도로 전개 제어가 불가능해진다. 또한, 구조물의 부재 개수가 증가함에 따라, 각각의 전개 구조는 서로 다른 속도로 전개 될 수 있다. 구동기 근처에서 전개 속도가 빨라져, 전체 구조의 전개속도는 동기화 되지 않는다 [8, 9]. 따라서, 전개 구조물의 동적 강성, 전개에 필요한 작동력 그리고 구조물의 전개 특성을 예측하는 것이 안테나 설계에서 매우 중요하다.

본 논문에서는 전개형 메쉬 안테나의 동적 강성 설계 및 다물체 동역학을 이용한 요구되는 전개 구동력 그리고 전개 특성을 분석하고자 한다. 프레임(frame) 요소(element)를 이용하여 전개 구조물을 모델링한다. 다각 형상의 팬터그래프 구조의 전개/수납된 형상에 따른 고유진동수 및 고유모드를 분석한다. Kane's 방정식을 이용하여 전개형 구조물의 다물체 동역학 방정식을 유도하고 PUTD (pseudo upper triangular decomposition) 방법을 적용하여 구속조건 문제를 해결하였다. 단위 전개 구조물의 동적거동 특성 해석을 바탕으로 설계된 전개형 안테나 구조의 실현성(feasibility)을 연구하고자 한다.

2. 전개 구조물 설계 및 고유진동 해석

2.1 Design of Deployable Ring Structure

메쉬 안테나는 단위(unit) 전개 구조로 이루어진 다각형 팬터그래프 구조물, 반사판 표면을 구성하는 메쉬 그리고 파라볼라 형상을 유지시켜주는 케이블 네트워크로 구성되어 있다 (Fig. 5). 다각형 트러스 구조(Fig. 6)의 단위 링크의 길이(L)는 반사판의 반지름(R) 그리고 다각형(N) 형상 함수로 설계할 수 있다 (Eq. 1).

$$L = 2R \sin \frac{\pi}{N} \quad (1)$$

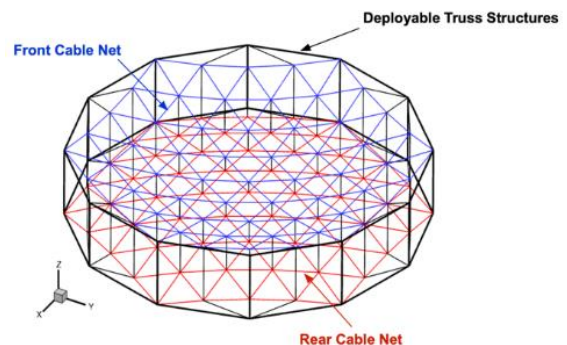


Fig. 5 Configuration of Deployable Mesh Antenna

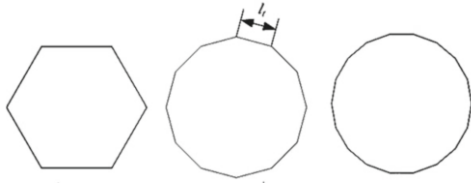


Fig. 6 Key Geometric Parameter of the Reflector

다각형 구조의 기구학적 해석을 위하여, 단위 전개구조의 단면해석을 수행해야 한다. 예를 들어 (Fig. 7), 두 개의 연속적인 링크 \overline{CE} , \overline{EB} 그리고 \overline{DG} , \overline{GA} 는 연속적으로 연결되어 있고, 각각의 점 A, B, C, 그리고 D는 이웃한 다른 전개 링크에 연결되어 있다. 회전 축은 평면에 수직하고, 모든 링크들은 회전과 병진운동이 가능하다. 따라서, 이 시스템은 1 자유도(D.O.F) 전개 메커니즘의 제어가 가능하다. 링크 \overline{CE} 와 \overline{DG} 의 회전(θ)을 통하여 단위 링크의 길이(L) 그리고 트러스 구조 전체의 전개 형상 및 속도를 조절할 수 있다. 하지만, \overline{AB} , \overline{CD} 그리고 \overline{EG} 축은 서로 평행하게 움직이는 구속조건이 있어야, 이 시스템은 기하학적으로 형상 변형이 가능하다.

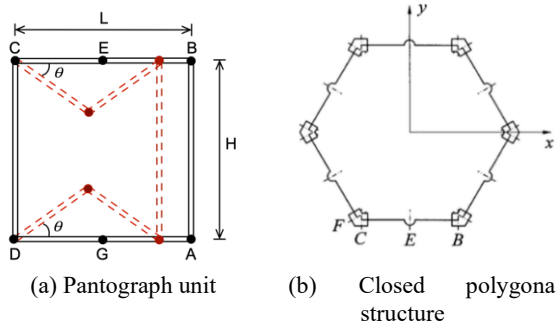


Fig. 7 Deployment Unit of the Pantograph Structure

폐 곡면의 다각형 전개구조 구현을 위해, 단위 단면들을 이어주는 추가적인 힌지가 필요하다 (Fig. 7.b). ABCD 단면에서 힌지 회전축은 자신 단면 평면에 수직이기 때문에 인접한 다른 단위 단면의 힌지와 적절한 각도를 유지해야 한다. 따라서, 힌지 내부의 기어 (gear) 설계를 통하여 다각형 링크 운동의 기구학적 적합성 (compatibility)과 1 자유도 동기화 전개 메커니즘 설계가 필요하다. Table 1은 단위 전개 구조 (Fig. 7)를 이용하여 설계된 다각형 전개 구조의 수납 그리고 전개 형상을 보여주고 있다. 반지름 (R)은 고정시켰고, 다각형 (N) 수가 증가할수록 링크의 길이 (L)와 높이 ($H=L$)는 감소하게 된다.

2.2 Structural Modeling and Eigenvalue Analysis

다각형 전개 구조물의 효과적인 동적학적 강성 설계를 위하여, 3차원 공간의 변위 (u, v, w)와 회전 (θ, ϕ, ψ)을 고려할 수 있는 프레임 (frame) 요소를 이용하여 유한요소 설계를 진행하였다. 2개의 노드 (node)

와 12개의 자유도를 가지는 요소를 사용하였고, Eq. (2)는 요소가 가지는 자유도를 나타낸다.

$$\{\mathbf{d}^e\} = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ \theta_1 \ \phi_1 \ \psi_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \theta_2 \ \phi_2 \ \psi_2\}^T \quad (2)$$

유한요소 정식화는 참고문헌 [10, 11]에서 자세히 유도되어져 있고, 요소의 강성 행렬은 Eqs. (3)와 (4)로 표시된다.

$$[\mathbf{K}^e] = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^e & \mathbf{K}_{12}^e \\ \mathbf{K}_{21}^e & \mathbf{K}_{22}^e \end{bmatrix} \quad (3 a)$$

$$[\mathbf{K}_{11}^e] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & 0 & 2c_3 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 2b_3 \end{bmatrix} \quad (3 b)$$

Table 1 Folded and Unfolded Configurations with respect to Polygon Numbers (N)

	Folded state	Unfolded state
(a) N=3		
(b) N=4		
(c) N=6		
(d) N=12		

$$[\mathbf{K}_{12}^e] = [\mathbf{K}_{21}^e]^T = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & -c_1 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & -b_2 & 0 & 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \quad (3 \text{ c})$$

$$[\mathbf{K}_{22}^e] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & -b_2 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & 0 & 2c_3 & 0 \\ 0 & -b_2 & 0 & 0 & 0 & 2b_3 \end{bmatrix} \quad (3 \text{ d})$$

$$a_1 = \frac{EA}{l}, \quad a_2 = \frac{GJ}{l}, \quad b_1 = \frac{12EI_z}{l^3}, \quad b_2 = \frac{6EI_z}{l^2}, \quad b_3 = \frac{2EI_z}{l},$$

$$c_1 = \frac{12EI_y}{l^3}, \quad c_2 = \frac{6EI_y}{l^2}, \quad c_3 = \frac{2EI_y}{l} \quad (4)$$

여기서, l , A , E , G 그리고 J 는 요소의 길이, 단면적, 탄성계수, 전단계수 그리고 극관성모멘트를 각각 나타낸다. I_x , I_y 그리고 I_z 는 각각 x , y , z 축에 대한 관성모멘트이다.

Figure 8는 전개형 구조물의 높이는 고정시키고 구조 형상이 6, 12 그리고 24 각형 일 때의 고유진동수와 고유모드를 보여주고 있다. 전개구조 중 1개의 수직 부재만을 고정시킨 경계조건을 사용하였다. 다각형 형상이 증가할수록 1차 비틀림 진동수가 작아지고 있는 경향을 보여주고 있다. 이것은 높이를 고정시키고 단위 구조의 개수를 증가시켜 고정된 경계조건에 비해 자유도가 상대적으로 늘어난 결과라 판단된다. Figure 9는 다각형의 개수를 증가시키면서 단위 링크의 길이와 높이가 줄어드는 결과이다. Figure 8과 동일한 경계조건을 사용하였다. 다각형 개수가 증가할수록 전개구조의 고유진동수가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 높이는 감소되고 원주 방향으로 부재 개수가 증가하여 동적 강성이 증가되는 것으로 판단된다. 다각형(N=24)의 경우, 고유진동수 및 고유모드를 보다 자세히 Fig. 10에서 살펴보았다. Figure 11는 동일한 경계조건을 이용한 수납되어진 상태의 고유진동수 및 고유모드를 보여주고 있다. 1개의 부재만 구속을 시킨 경계조건에서, 수납된 형상은 1차 비틀림 강성이 상대적으로 약해져 진동수가 낮아짐을 알 수 있다. 실제 우주 안테나의 경우, 발사체내 수납된 상태에서는 모든 자유도를 구속시키기 때문에 고유진동수는 전개된 상태에 비해 훨씬 높아질 것이다.

3. 전개 구조물의 동적 특성 해석

3.1 Multibody Dynamic Equations

전개형 트리스 구조물의 동역학적 메커니즘 분석을 위해 다물체 동역학을 이용한 시스템 모델 및 분석을 수행하였다 [12].

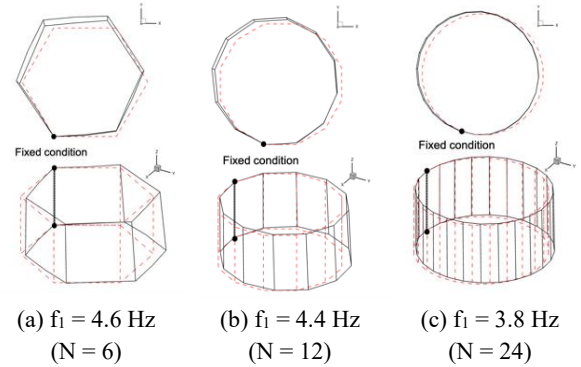


Fig. 8 Fundamental Natural Frequency and Mode Shape (Case I)

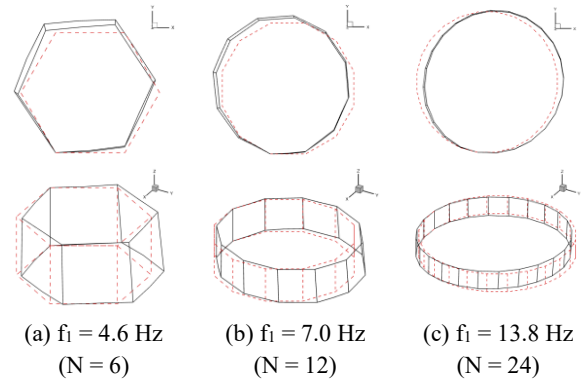


Fig. 9 Fundamental Natural Frequency and Mode Shape (Case II)

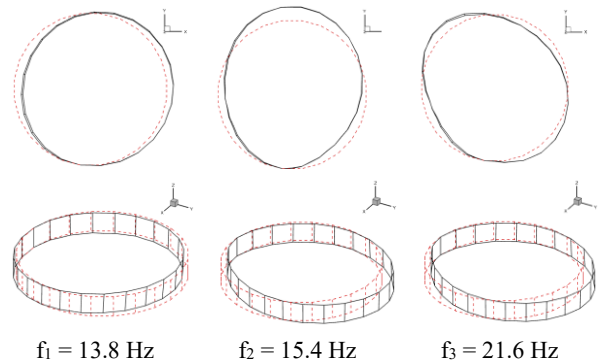


Fig. 10 Natural Mode and Frequency in Case of Unfolded State with N = 24

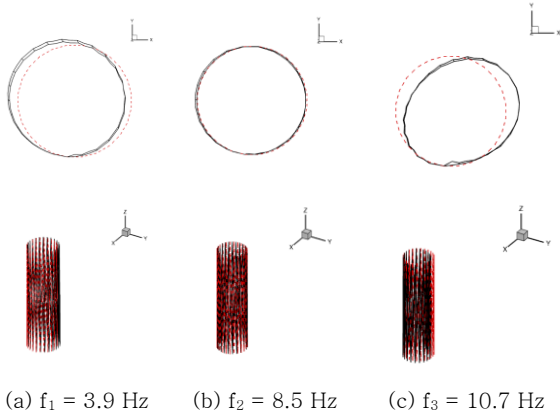


Fig. 11 Natural Mode and Frequency in Case of Folded State with $N = 24$

방향 코사인을 이용하면 3차원 공간에서 회전을 갖는 임의의 벡터를 Eq. (5)로 표현 가능하다.

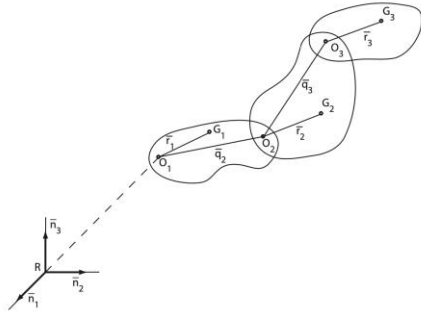


Fig. 12 Three Arbitrary Interconnected Rigid Bodies with No Translation Allowed at Joints

$$\{\bar{n}^\gamma\} = [S^{A0}] \{\bar{n}\} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } [S^{A0}] = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & cas\gamma + sas\beta c\gamma & s\gamma s\alpha - cas\beta c\gamma \\ -c\beta s\gamma & cac\gamma - sas\beta s\gamma & sac\gamma + cas\beta s\gamma \\ s\beta & -sac\beta & cac\beta \end{bmatrix}$$

, α , β , 그리고 γ 는 각각 x , y 그리고 z 축의 회전 각 그리고 s 와 c 는 sine 그리고 cosine을 각각 의미한다. 강체 B_k 와 B_j 가 서로 조인트에 의해 연결되어 있다 (Fig. 12). B_j 에 고정된 좌표 \bar{n}_i 에 대한 B_k 의 좌표 \bar{n}_i^k ($i=1, 2, 3$) 에 대한 각속도(${}^R\bar{\omega}^k$)는 Eq. (6)로 표현된다.

$${}^R\bar{\omega}^k = \{\dot{x}\}^T [\omega^k] \{\bar{n}\} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } [\omega^k] = [I \ S^{10} \ S^{20} \ \dots \ S^{k-1,0} \ \dots \ 0]^T.$$

Equation (7)은 각가속도를 표현하고 있다.

$${}^R\bar{\alpha}^k = \left(\{\ddot{x}\}^T [\omega^k] + \{\dot{x}\}^T [\dot{\omega}^k] \right) \{\bar{n}\} \quad (7)$$

다물체 시스템에서 임의의 위치 벡터와 속도 벡터는 각각 Eq. (8) 그리고 (9)로 표현된다.

$$\bar{P}_j = \left(\{\xi_1\}^T + \sum_{i=1}^j \{q_i\}^T [S^{i-1,0}] + \{r_j\}^T [S^{j,0}] \right) \{\bar{n}\} \quad (8)$$

$$\bar{v}_j = \left(\{\xi\}^T [V_s^j] + \{y\}^T [V^j] \right) \{\bar{n}\} \quad (9 \text{ a})$$

$$[V_s^j] = \begin{bmatrix} [I] \\ [S^{10}] \\ [S^{20}] \\ \vdots \\ [S^{j-1,0}] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad [V^j] = \begin{bmatrix} [S_{q_2}] [S^{10}] \\ [S_{q_3}] [S^{20}] \\ \vdots \\ [S_{q_j}] [S^{j-1,0}] \\ [S_{r_j}] [S^{j,0}] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9 \text{ b})$$

$$[S_{\xi_j}] = \begin{bmatrix} 0 & -\xi_{j_3} & \xi_{j_2} \\ \xi_{j_3} & 0 & -\xi_{j_1} \\ -\xi_{j_2} & \xi_{j_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (9 \text{ c})$$

속도 식에서 첫번째 항은 병진(translation) 그리고 두번째 항은 회전(rotation) 운동과 관계가 있다.

수치해석을 위한 운동방정식의 행렬(matrix) 표현식은 Kane's 운동방정식[13]을 이용하여 구할 수 있다. 정리된 식들을 이용하면, 운동방정식의 최종 표현식은 Eq. (10)로 정리할 수 있다.

$$[a] \{\ddot{x}\} + [b] \{\dot{x}\} + [c] \{x\} = \{f\} \quad (10 \text{ a})$$

$$[a] = \sum_k m_k [V_w^k] [V_w^k]^T + \sum_k [\omega^k] [I_{ok}] [\omega^k]^T \quad (10 \text{ b})$$

$$[b] = \sum_k m_k [V_w^k] [\dot{V}_w^k]^T + \sum_k [\omega^k] [I_{ok}] [\dot{\omega}^k]^T \quad (10 \text{ c})$$

$$[c] = \sum_k [\omega^k] [I_{ok}] [\Omega_x^k] [\omega^k]^T \quad (10 \text{ d})$$

여기서, $\{x\} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{3N}, x_{3N+1}, x_{6N}\}$. Equation (10 a)에서 $\{f\}$ 는 행렬식으로 표현된 일반화된 외력이고 Eq. (11)로 표현된다.

$$\{f\} = \sum_k [V_w^k] \{F_k\} + \sum_k [\omega^k] \{M_k\} \quad (11)$$

여기서, $\{F_k\}$ 와 $\{M_k\}$ 는 k 물체에 작용하는 외부힘과 모멘트를 의미한다. 행렬식으로 표현되는 운동방정식의 동역학적 특징은 행렬 $[V_w]$ 와 $[\omega^k]$ 에 의해 결정된다. 병진 그리고 회전 자유도의 $[a]$, $[b]$ 그리고 $[c]$ 행렬을 이용하여 다물체 운동방정식이 표현된다. 행렬 $[b]$ 와 $[c]$ 는 속도에 대한 2차 항으로 운동방정식에서 속도에 대한 코리올리스(Coriolis) 그리고 비선형 효과를 나타낸다.

3.2 Constrained Multibody Systems

구속조건이 포함된 다물체 시스템을 수식화 하였다. 자유도 n 을 가지는 일반화 좌표계 x_l ($l=1, 2, \dots, n$) 그리고 물체(k)의 운동방정식에서 m 개의 구속방정식을 가진다. 구속 힘을 고려한 Kane's 운동방정식은 Eq. (12)로 표현된다.

$$f_l + f_l^* - \lambda_i B_{li}^T = 0 \quad (12)$$

여기서, λ_i ($i=1, 2, \dots, m$)는 구해야 할 Lagrange 승수(multiplier)를 나타낸다. 다물체 시스템에서 매 계산 단계마다 Lagrange 승수를 결정해야 하기 때문에 운동방정식의 일반화된 구속 힘을 구하는 것은 많은 계산 시간이 소비된다. 따라서, 결정되지 않은 승수를 포함하여 구속조건 방정식들의 미분형태로 운동방정식을 계산하는 Augmented method를 이용하였다. 다물체 시스템의 부가적인 구속 힘은 Eq. 13과 같이 운동방정식에 포함된다.

$$[a]\{\dot{y}\} + [b]\{y\} + [c]\{y\} = \{f\} - [B]^T \{\lambda\} \quad (13)$$

구속방정식은 $B_{li}y_i = g_i$ ($l=1, \dots, n; i=1, \dots, m$)로 표현할 수 있다. B_{li} 는 구속 Jacobian 행렬 그리고 g_i 는 시간에 종속적인 함수를 나타낸다. 이를 미분하면, Eq.(14)로 표현된다.

$$[B]\{\dot{y}\} = -[\dot{B}]\{y\} + \{\dot{g}\} \quad (14)$$

Eqs. (13)와 (14)를 조합하면, Eq. (15)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H \\ G \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f \\ \dot{g} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

여기서, $H = -\{[b] + [c]\}\{y\}$ 그리고 $G = -[\dot{B}]\{y\}$ 이다.

n 개의 독립 운동방정식을 가지는 다물체 시스템이 m

개의 구속조건을 가지게 되면, $n-m$ 개의 자유도를 가지게 된다. 미지의 m 개의 승수를 가지는 미분방정식을 풀기 위해서는, Eq. (16)로 표현될 수 있는 행렬 T 를 구하면 된다.

$$[T][B]^T = 0 \quad (16)$$

여기서 행렬 T 는 행렬 B 의 직교(orthogonal) 행렬이고 $m \times n$ 의 크기를 가진다. Eq. (13)에 행렬 T 를 곱하면 Eq. (17)로 표현된다.

$$[T]([a]\{\dot{y}\} + [b]\{y\} + [c]\{y\}) - [T]\{f\} = 0 \quad (17)$$

Eqs. (14)와 (17)을 조합하면 일반화된 구속 힘은 제거되고, $n-m$ 개로 축약된 운동방정식 Eq. (18)를 얻을 수 있다.

$$[A]\{\dot{y}\} = [D] \quad (18 a)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [T][a] \\ [B] \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (18 b)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} [T]([f] - [b]\{y\} - [c]\{y\}) \\ -[\dot{B}]\{y\} + \{\dot{g}\} \end{bmatrix} \quad (18 c)$$

행렬 A 는 positive definite 하기 때문에 Eq. (19)로 표현된다.

$$\{\dot{y}\} = [A]^{-1} [D] \quad (19)$$

초기조건과 시간적분을 이용하면 Eq. (19)의 시간에 따른 다물체 시스템의 동적특성을 구할 수 있다. 본 연구에서는 직교행렬 T 를 구하기 위하여 Amirouche [14]가 제시한 PUTD (pseudo upper triangular decomposition) 방법을 이용하였다. 이 방법의 목적은 행렬 B 를 upper-triangularize 행렬로 만들고 다시 이를 영행렬(null matrix)로 만들어주는 행렬을 찾아내는 것이다. PUTD 방법은 Gramm-Schmidt 과정을 통하여 Householder 변환을 이용하여 B 행렬을 찾는 다 [15].

Figure 13은 구속조건을 포함한 다물체 동역학 해석 순서도를 보여주고 있다. Equation (5)에서 정의된 변환행렬을 이용하여 상대적인 각속도 그리고 속도를 구하고 다물체 동역학 방정식을 구성하여 구속조건을 해결하는 방법이다. 시간(t)에 따른 위치(y_c) 구속조건, $y_c = a_1 t^2 + a_2$ 이 가해진 2개 링크 구조의 다물체 동역학 해석을 하였다 (Fig. 14). 중력효과를 고려하였고, 각 링크의 길이, 질량, 구속 및 초기 조건은 Eq. (20)과 같다 [12].

$$L_1 = L_2 = 1 \text{ m}, \quad m_1 = m_2 = 36 \text{ kg}, \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$a_1 = 1 \text{ m/s}^2, \quad a_2 = 0, \quad \theta_1 = 70^\circ, \quad \theta_2 = -140^\circ \quad (20)$$

Figure 15는 시간에 따른 각 링크의 회전각도 θ_1 그리고 θ_2 의 계산결과를 보여주고 있다. Runge-Kutta 시간 적분법을 사용하였고 참고문헌[12] 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Figure 11에서 정의된 단위 팬터그래프 구조 2개를 서로 연결시킨 전개구조물의 다물체 동역학 해석을 수행하였다. 힌지 C와 D 지점에 작동 토크를 가해주었고, 초기 수납된 상태의 각도, $\theta = 80^\circ$ 로 초기조건을 주었다. 링크 \overline{AB} 와 \overline{CD} 는 서로 평행하게 움직이는 구속 조건을 주었다. 링크 \overline{AB} , \overline{CD} , \overline{BC} , 그리고 \overline{AD} 는 동일한 길이(L), 질량(m) 그리고 관성모멘트(I_x , I_y , I_z)를 가지고 있다 (Eq. 21).

$$L = 1 \text{ m}, \quad H = L, \quad m = 0.33 \text{ kg},$$

$$I_x = I_z = mL^2/12, \quad I_y = 0 \quad (21)$$

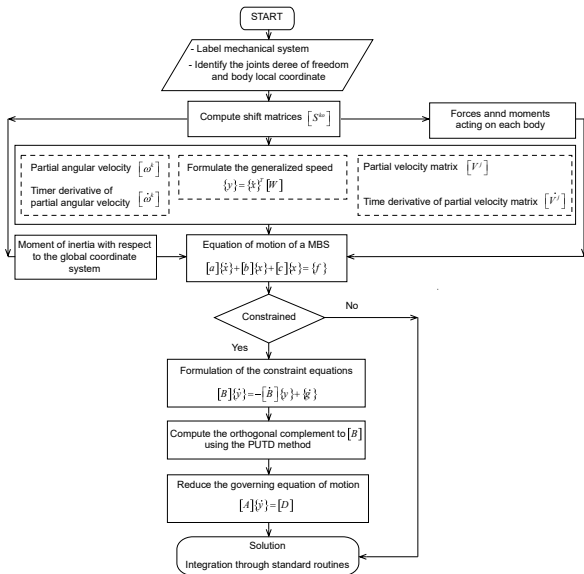


Fig. 13 Flowchart for Computing Multibody Dynamics

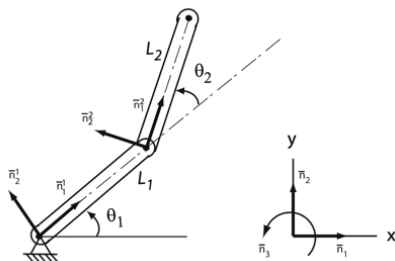
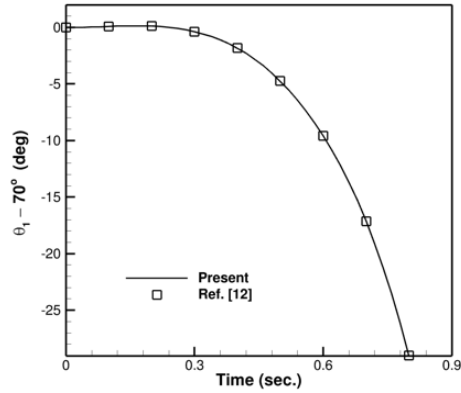
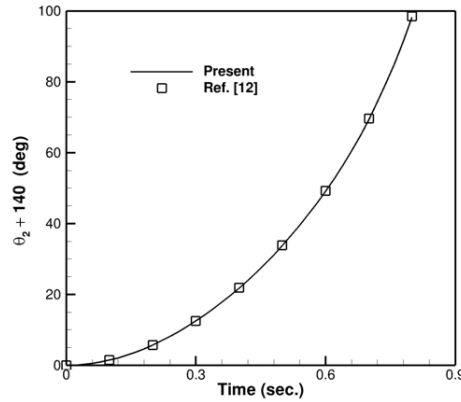


Fig. 14 Planar Two-link Manipulator



(a) Time history of angle, θ_1

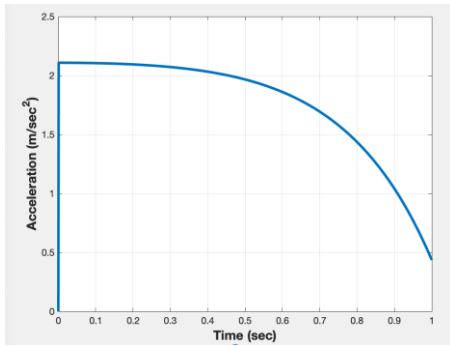


(b) Time history of angle, θ_2

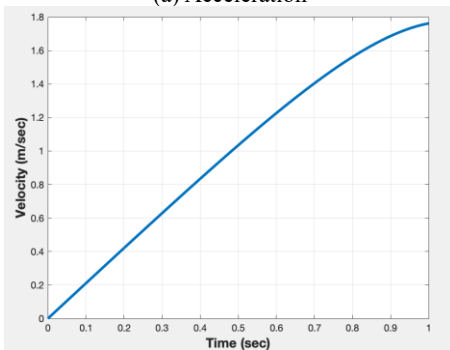
Fig. 15 Prescribed Motion Constraint

작동 힌지 C와 D에서 토크($T = 3 \text{ N}\cdot\text{m}$)가 작용할 때의 전개구조물 우측 끝단의 속도 그리고 가속도를 관찰하였다 (Fig. 16). 가속도는 초기 작동 토크에 의해 갑자기 발생을 하다가 링크들의 병진 그리고 회전 운동으로 점점 줄어들게 된다. 속도는 가속도의 영향으로 계속 증가를 하다가 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 힌지 C와 D의 회전각도(θ)를 관찰하면, 점점 각도가 감소하여 팬토그래프 구조가 전개되지만, 1 sec. 동안 완전히 전개가 되지 못함을 알 수 있다. 수납된 상태와 전개된 형상은 Fig. 17에 나타나 있다.

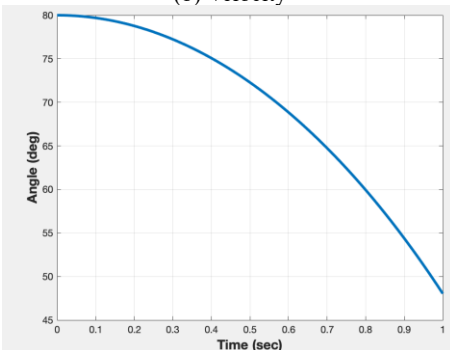
Figure 18은 작동 토크, $T = 7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 가해준 해석 결과이다. 전개시 순간적으로 가속도는 5 m/s^2 가 발생하고 전개가 어느 정도 진행되면, 팬토그래프 구조의 기하학적 조건으로 가속도는 감소하게 된다. 전개가 완전히 멈추게 되면, 부재들의 관성에 의해 약 -21 m/s^2 의 가속이 발생하게 되고 이것은 전개가 완료된 후 구조진동을 유발할 것으로 예상된다. 최대 속도는 2.7 m/s 가 발생하고 구조의 기하학적 조건으로 속도는 감소하게 되고 최종적으로 멈추게 된다. Figure 19는 수납된 상태와 전개된 팬토그래프 구조 형상을 보여주고 있다.



(a) Acceleration

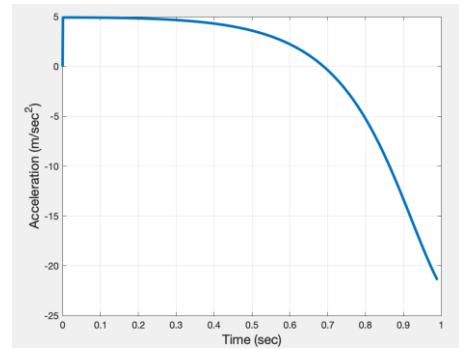


(b) Velocity

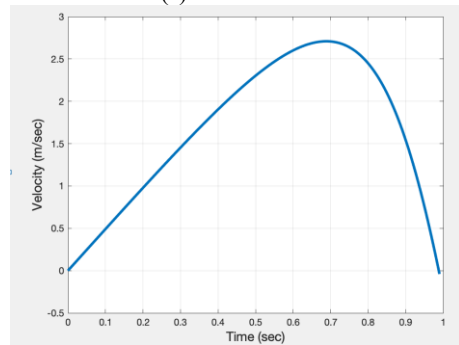


(c) Angle

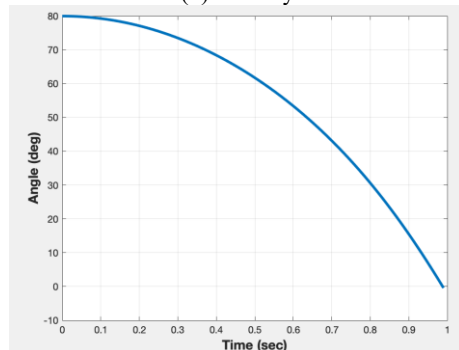
Fig. 16 Deployment Analysis with $T = 3 \text{ N-m}$



(a) Acceleration



(b) Velocity



(c) Angle

Fig. 18 Deployment Analysis with $T = 7 \text{ N-m}$

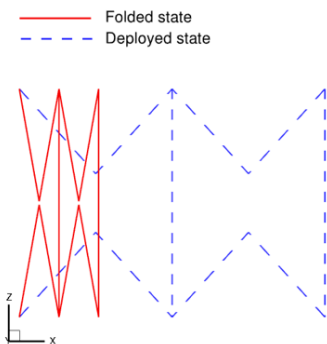


Fig. 17 Unfolded Configuration of Two Unit Deployable Structure ($T = 3 \text{ N-m}$)

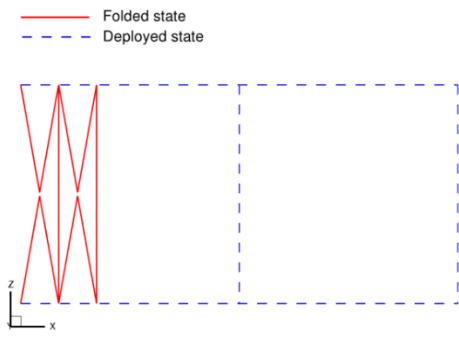


Fig. 19 Unfolded Configuration of Two Unit Deployable Structure ($T = 7 \text{ N-m}$)

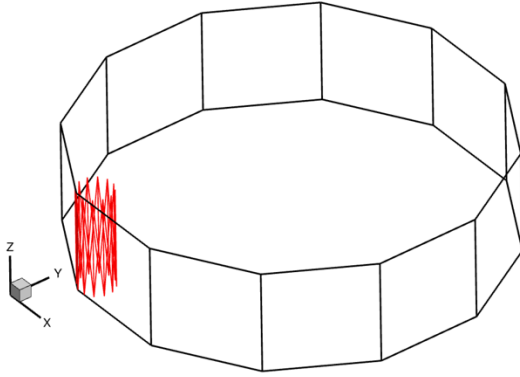
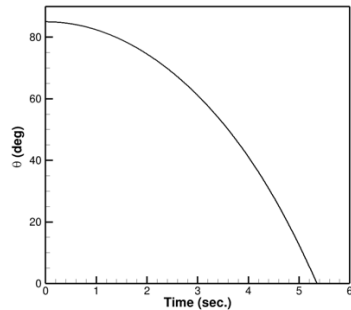


Fig. 20 Folded and Unfolded Configuration

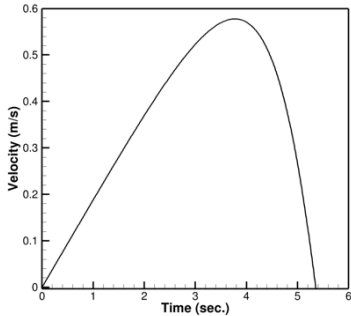
12개의 단위 팬터그래프 구조를 연결시킨 다각형 형상으로 만든 전개 구조물의 다물체 동역학 해석을 수행하였다. Figure 20은 메쉬 안테나 전개구조물(지름 2 m)의 수납된 형상과 완전히 전개된 형상을 보여주고 있다. 단위 팬터그래프 구조는 동일한 링크 길이(L), 질량(m) 그리고 관성모멘트(I_x, I_y, I_z)를 가지고 있다 (Eq. 22).

$$L=0.52\text{ m}, H=L, m=0.3\text{ kg},$$

$$I_x=I_z=mL^2/12, I_y=0 \quad (22)$$



(a) Angle



(b) Velocity

Fig. 21 Deployment Analysis with $T = 1\text{ N}\cdot\text{m}$

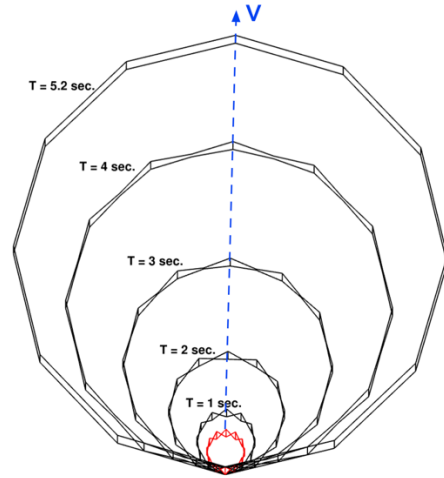


Fig. 22 Deployment Process

초기 조건 ($\theta=85^\circ$)으로 수납되어져 있고, 작동한지에서 구동력 $T=1\text{ N}\cdot\text{m}$ 가 가해진다. 중력효과는 고려하지 않았다. 약 5.2 sec에 전개가 완료되는 것을 알 수 있고, 최대 속도는 약, $v=0.58\text{ m/s}$ 으로 전개되다가 점점 속도가 감소되어 전개가 완료되는 것을 알 수 있다 (Fig. 21). Figure 22는 각각 시간에 따른 전개 형상 및 속도 벡터를 보여주고 있다.

4. 결 론

전개형 반사판 안테나의 동적 강성 설계 및 다물체 동역학을 이용한 요구되는 전개 구동력 및 전개 특성을 분석하였다. 여러 형상에 따른 전개구조물의 고유진동수 및 고유모드를 분석하였고, 다물체 동역학 시뮬레이션을 통해 설계된 전개형 구조의 동적 거동 특성을 살펴보았다.

안테나의 요구되는 동적 성능 및 전개 특성에 따라, 강성 및 구동력 설계가 요구되어진다. 전개 완료 후 발생할 수 있는 구조진동 감쇠를 위해, 관성에 의한 가속력을 줄여야 하며 전개시스템에서 적절할 감쇠기 (damper) 설계가 필요하다. 또한, 전개 구조 부재의 증가에 따른 구조물의 유연도(flexibility)를 고려한 동적 해석이 필요하며, 전개 동기화 및 1 자유도 전개 제어 가능성을 분석해야 할 것이다.

후 기

이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제 지원으로 연구되었음

References

- [1] A.G. Tiber, "Deployable tensegrity structures for space applications," *Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology*, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden, 2002.
- [2] C.J. Magenot, J. Saniago-Prowald, and K. Klooster, "Large reflector antenna working group final report," *ESA Technical Note*, TEC-EEA, 2010.
- [3] K. Miura and Y. Miyazaki, "Concept of the tension truss antenna," *AIAA Journal*, vol. 28, no. 6, pp. 1098-1104, 1990.
- [4] L. Datashvili, "Review and evaluation of the existing designs/technologies for space large deployable apertures," *International Scientific Conference on Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas*, Tbilisi, Georgia, 2009.
- [5] A. Robederer, Historical overview of the development of space antennas, *Space Antenna Handbook*, Wiley, New York, pp. 250-307. 2012.
- [6] Astro Aerospace, AstroMesh™ deployable reflector data sheet DS-409 07/04, Northrop Grumman Space Technology, 2004.
- [7] P. Fanning and L. Hollaway, "The deployment analysis of a large space antenna," *International Journal of Space Structures*, vol. 8, no. 3, 1993.
- [8] Y. Peng, Z. Zhao, M. Zhou, and J. He, "Flexible multibody model and the dynamics of the deployment of mesh antennas," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 40, no. 6, pp. 1499-1506, 2017.
- [9] A. G. Cherniavsky, V. I. Gulyayev, V. V. Gaidaichuk, and A. I. Fedoseev, "Large deployable space antennas based on usage of polygonal pantograph," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 18, pp. 139-145, 2005.
- [10] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, 1982.
- [11] A. Jennings, "Frame analysis including change of geometry," *Journal of the Structural Division*, vol. 94, no. 3, pp. 627-644, 1968.
- [12] F. Amirouche, *Fundamentals of Multibody Dynamics: Theory and applications*, Birkhauser, 2004.
- [13] T.R. Kane and D. A. Levinson, *Dynamics: Theory and Applications*, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [14] F. Amirouche and T. Jia, "Automatic elimination of the undetermined multipliers in Kane's equations using a pseudo uptriangular decomposition (PUTD) method," *Computers and Structures*, vol. 27, no. 2, pp. 203-210, 1987.
- [15] W. C. Walton and E. C. Steeves, "A new matrix theorem and its applications for establishing independent coordinates for complex dynamical systems with constraints," *NASA Technical Report*, NASA TR R-326, 1969.