creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266205

2017 년 2 月
碩士學位 論文

트러스를 이용한 중력 보상기구의 합성방법

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 相 亨

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

트러스를 이용한 중력 보상기구의 합성방법

Synthesis method of the static balancer using truss

2017 年 2 月 24 日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 相 亨

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

트러스를 이용한 중력 보상기구의 합성방법

指導敎授 趙 昌 鉉

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함

2016 年 10 月

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 相 亨

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

金相亨의 碩士學位論文을 認准함

委員長　朝鮮大學校 敎授　李鎭伊 (印)

委　員　朝鮮大學校 敎授　朴貞俠 (印)

委　員　朝鮮大學校 敎授　趙昌錫 (印)

2016 年 11 月

朝鮮大學校 大學院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT ..... **ix**

제 1 장 서론 **1**

제 1 절 연구배경 **1**

제 2 절 연구목표 **4**

제 2 장 공간 사상 기법 **9**

제 1 절 공간 사상 **9**

제 2 절 두 공간에서의 포텐셜 에너지 **10**

제 3 절 설계 방정식 **11**

제 4 절 사상행렬의 결정 **12**

제 3 장 변환 설계방법 **14**

제 1 절 **Baranov truss**와 파생기구 사이의 관계 **14**

제 2 절 변형규칙 **14**

제 3 절 삭제규칙 **16**

제 4 장 **Baranov truss**의 중력보상기 설계 **18**

제 1 절 Θ_1에 대한 **5-link Baranov truss** **19**

제 2 절 Θ_1의 대체 관절공간 **22**

제 3 절 Θ_2에 대한 **7-link Baranov truss** **24**

제 4 절 Θ_3에 대한 **7-link Baranov truss** **27**

제 5 절 **Baranov truss**의 중력보상기 **31**

제 5 장 설계 예 **33**

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 5-link Baranov truss에서 파생된 기구들 37
1. Case 1: Associated linkage 37
2. Case 2: Slider crank 39
3. Case 3: Swinging block linkage 40
4. Case 4: Turning block linkage 40
5. Case 5: Cardanic motion 41
6. 5-link Baranov truss에서 파생된 기구의 중력보상기 42
7. 미끄럼 관절의 고려 43
제 2 절 7-link Baranov truss에서 파생된 기구들 I 46
1. Case 1: Associated linkage 48
2. Case 2: Sliding mechanism 1 49
3. Case 3: Sliding mechanism 2 51
4. Case 4: Sliding mechanism 3 52
5. Case 5: Sliding mechanism 4 53
6. Case 6: Sliding mechanism 5 55
7. 7-link Baranov truss에서 파생된 기구의 중력보상기 I 57
제 3 절 7-link Baranov truss에서 파생된 기구들 II 59
1. Case 1: Associated linkage 61
2. Case 2: Sliding mechanism 1 62
3. Case 3: Sliding mechanism 2 63
4. Case 4: Sliding mechanism 3 65
5. Case 5: Sliding mechanism 4 67
6. 7-link Baranov truss에서 파생된 기구의 중력보상기 II 69
제 4 절 등가 중력보상기 71

제 6 장 모의실험 75

제 7 장 실험 84

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 8 장 토의 86

제 9 장 결론 90

참고문헌 92

CURRICULUM VITAE 96

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목차

Table 1. Previous researches for a design method of the gravity compensator 2
Table 2. Parameters and phase angles (radian) for the five-link Baranov truss 82
Table 3. Parameters and phase angles (radian) for the seven-link Baranov truss 82
Table 4. Phase angles (radian) for Fig. 5 -9 82
Table 5. Phase angles (radian) for Fig. 5 -18 82
Table 6. Phase angles (radian) for Fig. 5 -25 82
Table 7. Spring constans k_i (N/m). 83
Table 8. Virtual motors for simulation models 83
Table 9. Spring constants (N/m) 83
Table 10. Parameters for the fabricated gravity compensator 85
Table 11. Original spring constants k_i (N/m) for k_{i_new} 88

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도 목차

Fig. 1 -1. The proposed design procedure..... 4
Fig. 1 -2. Relationship of between the five-link Baranov truss and mechanisms [35]. 5
Fig. 1 -3. Relationship of between the seven-link Baranov truss and mechanisms [34]. 6
Fig. 1 -4. The transformation process of gravity compensators..... 7
Fig. 2 -1. A 1-DOF gravity compensator [11]..... 11
Fig. 3 -1. A new design equation from the design equation of an associated linkage..... 17
Fig. 4 -1. Baranov trusses [37]..... 19
Fig. 4 -2. Relationships between the base and alternative joint space and gravity compensator space [32]..... 22
Fig. 4 -3. The design equation of Θ_2..... 27
Fig. 4 -4. The design equation of Θ_3..... 30
Fig. 4 -5. Gravity compensators of Baranov trusses..... 32
Fig. 5 -1. Design overview I: gravity compensators of derived mechanisms from the five-link Baranov truss..... 34
Fig. 5 -2. Design overview II: gravity compensators of derived mechanisms from the seven-link Baranov truss..... 35
Fig. 5 -3. Design overview III: gravity compensators of derived mechanisms from the seven-link Baranov truss..... 36
Fig. 5 -4. Four bar linkage and sliding mechanisms [35]. 37
Fig. 5 -5. The design equation for Fig. 5 -4(a)..... 38
Fig. 5 -6. The design equation for Fig. 5 -4(b) 39
Fig. 5 -7. The design equation for Fig. 5 -4(d) 41
Fig. 5 -8. The design equation for Fig. 5 -4(e)..... 42
Fig. 5 -9. Gravity compensators for Fig. 5 -4(a)-(e) 43
Fig. 5 -10. Gravity compensators of the cardanic motion with the offset angle γ in the gravity 46
Fig. 5 -11. Stephenson mechanism and sliding mechanisms [34]. 47
Fig. 5 -12. The design equation of Fig. 5 -11(a) 49
Fig. 5 -13. The design equation of Fig. 5 -11(b)..... 50
Fig. 5 -14. The design equation of Fig. 5 -11(c) 52
Fig. 5 -15. The design equation of Fig. 5 -11(d)..... 53
Fig. 5 -16. The design equation for Fig. 5 -11(e)..... 54
Fig. 5 -17. The design equation for Fig. 5 -11(f) 56
Fig. 5 -18. Gravity compensators for Fig. 5 -11(a)-(f)..... 58
Fig. 5 -19. Watt mechanism and sliding mechanisms [34]. 60
Fig. 5 -20. The design equation of Fig. 5 -19(a) 62
Fig. 5 -21. The design equation of Fig. 5 -19(b)..... 63
Fig. 5 -22. The design equation of Fig. 5 -19(c) 65
Fig. 5 -23. The design equation of Fig. 5 -19(d)..... 67
Fig. 5 -24. The design equation of Fig. 5 -19(e) 68
Fig. 5 -25. Gravity compensators for Fig. 5 -19(a)-(e) 70

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 5 -26. Gravity compensator of the four bar linkage derived from 7-link Baranov truss. ... 72
Fig. 5 -27. The design equation for Fig. 5 -26 ... 73
Fig. 6 -1. Simulation models I ... 76
Fig. 6 -2. Simulation models II ... 77
Fig. 6 -3. Simulation models III ... 78
Fig. 6 -4. Results of four bar linkage and sliding mechanisms ... 79
Fig. 6 -5. Results of Stephenson and sliding mechanisms. ... 80
Fig. 6 -6. Results of Watt mechanism and sliding mechanisms ... 81
Fig. 6 -7. Results of simulation with the offset angle γ ... 81
Fig. 7 -1. The fabricated gravity compensator of Fig. 5 -18(f) ... 84
Fig. 7 -2. Various poses of the fabricated gravity compensator. ... 85
Fig. 8 -1. The original of k_{i_new} for the three simulation models ... 87
Fig. 8 -2. Temporal variations of potential energy for the k_{i_new} and original springs ... 89

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기호 설명

θ_i	The rotation angle of a ith joint
θ_{gi}	The rotation angle of a ith unit gravity compensator
Θ	The joint space
Θ_g	The gravity compensator space
$\Theta_{i,a}$	The alternative joint space set for the ith joint space
V_k	The potential energy of spring
V_m	The potential energy of mass
g	Gravity
$\mathbf{g}$	The gravitational vector
t	Time
ϕ_i	The ith phase angle
$\boldsymbol{\phi}$	The vector of a phase angle
${}^0\mathbf{P}_i$	The position of the center of mass of link i with respect to the {0} frame
${}^0\mathbf{T}_i$	The transformation matrix
m_i	The mass of a link i
s_i (or c_i)	$\sin(\theta_i)$ (or $\cos(\theta_i)$)
$diag[x_1,\cdots, x_n]$	$n \times n$ diagonal matrix

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$\mathbf{J}$	The mapping matrix
$\mathbf{J}^T$	The transpose of the mapping matrix
l_i	The length of link i
l_{ia} and l_{ib}	Lengths of edges of a ternary link
l_{ig}	The distance of the center of mass of link i
α_i and β_i	Angles between edges of a ternary link and its center of mass
k_i	The ith spring constant
k_{i_new}	The new spring constant for the ith original spring constant

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Synthesis method of a static balancer using truss

Sanghyung Kim
Advisor: Prof. Changhyun Cho, Ph.D.
Dept. of Control & Instrumentation Eng.
Graduate School of Chosun University

This research presents a synthesis method by which a static balancer of a truss is transformed into static balancers of various mechanisms. For conventional design methods the kinematics and potential energy of every mechanism should be computed to design a static balancer. To overcome this limitation the concepts of kinematic syntheses (e.g., Baranov truss and associated linkage) are adopted to the design of a static balancer. The space mapping method is used to design a static balancer in this paper. A sliding mechanism can be derived from a Baranov truss combining two concepts of the Baranov truss and associated linkage. For example, elimination of a link at the 5-link Baranov truss results in a 4-bar linkage and a slider-crank mechanism can be derived from a 4-bar linkage when replacing a revolute joint by a prismatic joint. Variations of kinematic parameters and joint variables are investigated in the viewpoint of the static balancing during transforming a truss (or an associated linkage) to an associated linkage (or a sliding mechanism). The conversion rules are determined in which variations of kinematic parameters and joint variables are summarized in the viewpoint of the potential energy or gravitational torques. When applying the conversion rules to the design equation of the space mapping method, successive deletions of row and column vectors of the design equation occur. These deletion procedures are referred as the deletion rules in this paper. Static balancers of various mechanisms (four-bar linkage, Watt mechanism, Stephenson mechanism and sliding

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

mechanisms) are derived from those of the five-link and seven-link Baranov trusses using the deletion rules. Thus, no computation of kinematics and potential energy is necessary to obtain static balancers of various mechanisms, once a static balancer of a truss has been designed. Simulations results showed that complete gravity compensation is achieved for all derived mechanisms from Baranov trusses. Experiments are conducted with the sliding mechanism derived from the seven-link Braranov truss and show that gravitational torques are effectively counterbalanced.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

최근 로봇기술의 발달에 의해서, 로봇 매니퓰레이터는 산업현장, 서비스업 등 다양한 분야에서 인간과 협업하여 작업하거나 또는 인간이 힘든 작업을 대신 수행한다. 로봇 매니퓰레이터의 모터출력은 자중을 견디기 위한 중력 보상토크와 이동하기 위한 동 토크로 활용된다. 로봇 매니퓰레이터가 저속으로 움직일 때, 로봇 매니퓰레이터의 구동토크보다 중력토크가 더 크게 발생하여 자세유지를 위한 비효율적인 에너지 소비가 발생한다. 중력보상기가 장착된 매니퓰레이터는 중력보상기에 의해 중력토크를 상쇄시킬 수 있으므로, 일반적인 매니퓰레이터 보다 높은 에너지 효율을 가질 수 있다. 완전한 중력보상은 모든 자세에서 매니퓰레이터의 모든 중력토크를 상쇄하는 것을 의미하고, 불완전 중력보상은 중력토크 일부만 상쇄하는 것을 의미한다.

이러한 이점으로 중력보상기는 재활 시스템을 포함하여[1-3], 직렬[4-6] 또는 병렬[7-9] 매니퓰레이터 그리고 얼굴로봇[10] 등 다양한 분야에서 이용되고 있다. 1자유도 중력보상기[11-14]와 다자유도 중력보상기[15-17]가 개발되었다. R. Nathan은 한 끝은 베이스에 다른 한 끝은 회전하는 링크에 고정된 스프링으로 구성된 1자유도 중력보상기를 제안한 바 있다[11]. Ulirich와 Kumar는 풀리와 와이어를 활용한 1자유도 중력보상기를 고려하였다[12]. Koser는 내접 캠 기구를 설계하여 1자유도 중력보상을 수행하였다. 그리고 이를 통해서, 3자유도 5절 기구에 적용하여 중력보상이 적용 가능함을 보였다[13]. 비원형 풀리를 가진 1자유도 중력보상기로 구성된 5절 기구의 중력보상기를 제안하였다[14]. 또한, 매니퓰레이터의 가변하중을 고려한 중력보상기에 대한 연구가 진행되었다[18-24].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

중력보상기 설계과정은 크게 두 단계로 구분된다: 1. 스프링 위치 설정, 2. 스프링 상수 계산. 이중 스프링 위치결정은 가장 어려운 단계로 해당 기구의 특성을 파악하여 모든 자세에서 완전한 중력보상이 이루어지도록 스프링 배치를 해야 한다. 일단 스프링 배치를 추정하면, 두 번째 단계인 스프링 상수 계산을 수행한다. 부적절한 스프링 배치 시, 스프링 상수가 함수 형태로 계산되거나 불완전 중력보상이 발생한다. 따라서 중력보상기 설계 시, 스프링 배치는 가장 중요하며 어려운 단계이며 많은 설계 경험이 필요하다.

Table 1. Previous researches for a design method of the gravity compensator

Previous researches	Computation of the spring constant	Placement of the spring
[25] G.J. Walsh, D.A. Streit, and B.J. Gilmore (1991)	Manual	Manual
[26] D. A. Streit and B. J. Gilmore (1989)	Manual	Manual
[27] S.K. Agrawal and A. Fattah (2004)	Manual	Manual
[28] S. Deepak (2012)	Manual	Manual
[29] P.Y Lin, W.B. Shien, and D.Z. Chen (2012)	Automatic	Automatic
[30] Y.-Y. Lee and D.-Z. Chen (2014)	Automatic	Automatic
[31] C.H. Cho, and S.C. Kang (2014)	Automatic	Automatic

다양한 중력보상기 설계방법들이 제안되었다[25-31]. Table 1은 중력보상기 설계과정(스프링 장착위치 결정과 스프링 상수 계산)을 기준으로 제안된 설계방법[25-31]의 특성을 정리한 것이다. Walsh, Streit 그리고 Gilmore는 중력보상기의 스프링상수를 결정하기 위한 에너지 방법을 제안한 바 있다[25]. Streit와 Gilmore는 2 자유도 회전을 가지는 링크에 대한 *n*-스프링 밸런서의 설계방법을 제안하였다[26]. Agrawal와 Fattah는 매니퓰레이터의 질량중심을 보조 평행사변형기구로 표현하여 스프링을 장착하는 방법을 개발하였다[27]. Deepak는 회전관절과 구형관절로 구성된 일반적인

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

강체 링크기구에 대한 정적 평형 방법을 제안하였다[28]. 설계방법[25-28]을 통해서 복잡한 기구에 대한 중력보상기 설계 시, 설계자가 스프링 위치를 결정해야 하는 어려움이 있으며 설계자의 경험과 능력이 요구된다. 이러한 문제를 극복하기 위해서, 이론적으로 스프링 배치와 상수결정이 동시에 가능한 설계 방법이 제안되었다[29-31]. 평면 매니퓰레이터에 관하여, Stiffness block matrix에 의해 링크 사이에 직접 스프링을 설치하는 설계방법이 제안되었다[29-30]. 공간사상에 근거하여, 단위 중력보상기의 위치와 개수를 동시에 결정하는 설계방법이 제안되었다[31].

제안된 설계방법[25-31]을 통해서, 다양한 기구들에 대한 중력보상기는 설계할 수 있다. 그러나, 각각의 기구에 대한 기구학 해석과 포텐셜 에너지 계산과정이 필요하다. 이러한 문제를 극복하기 위해서, 대응링크 개념이 중력보상 설계방법[31]에 도입되었다[32-33]. 대응링크 개념은 기구 합성방법으로써, 기존 중력보상기를 변형하여 새로운 중력보상기 설계를 가능하게 하였다[32-33]. 즉, 새로운 중력보상기 설계과정에서 해당기구에 대한 기구학적 해석과 포텐셜 에너지 계산을 수행하지 않는 장점이 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 연구목표

본 연구에서는 [32, 33]의 대응링크 방법을 기반으로, 트러스를 이용한 중력 보상기구의 설계 방법을 제안한다. Fig. 1 -1은 일반적인 중력보상 설계과정과 본 연구에서 제안한 설계과정을 나타낸다. 다양한 대응 링크기구 (즉, 4절 링크기구, Stephenson and Watt 기구)와 슬라이딩 기구에 대한 중력보상기들은 이전에 제안된 설계방법으로 얻을 수 있다[25-31]. 하지만, 각각의 기구들에 대해서 기구학 해석과 포텐셜 에너지 계산과정이 필요하다. 이러한 문제를 극복하기 위해서, 본 연구에서는 기구합성 방법(대응 링크기구와 Baranov truss 개념)을 중력보상 설계방법(공간 사상기법)에 적용하여, Baranov truss의 중력보상기에서 대응 링크기구의 중력보상기 및 슬라이딩 기구의 중력보상기를 유도한다. 즉, 기구학적 해석과 포텐셜 에너지 계산은 Baranov truss에 대해서 단 한번 수행한다.

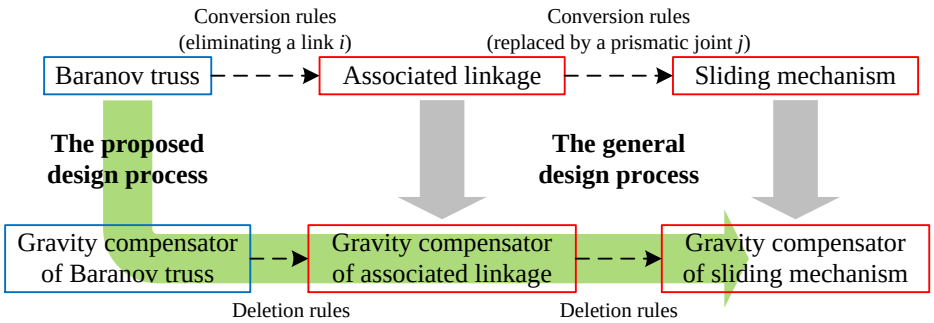


Fig. 1 -1. The proposed design procedure.

기구합성 방법을 중력보상 설계에 적용하기 위해서, 중력보상 설계관점에서 기구합성 과정을 관찰한다. 트러스는 구조물로 자유도가 영이다. 하지만, 트러스에서 링크를 제거하면, 트러스는 운동 가능한 링크기구가 된다. 이때, 링크기구는 대응 링크기구에 해당되며, 대응 링크기구 개념은 회전관절로 이루어진 1자유도 링크기

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

구에서 슬라이딩 기구를 얻기 위해서 이용되었다[34, 35]. Baranov truss는 링크기구 또는 kinematic chain을 얻기 위해서 사용된 바 있으며[36], 다양한 Baranov truss가 제안되었다[36, 37]. Baranov truss 개념과 대응 링크기구 개념을 조합하면, Baranov truss에서 슬라이딩 기구가 유도될 수 있다. Fig. 1 -2와 Fig. 1 -3은 Baranov truss, 대응 링크기구 그리고 슬라이딩 기구 사이의 관계를 나타낸다. 4절 링크기구는 Fig. 1 -2의 5-link Baranov truss에서 링크 하나를 제거하거나, 또는 Fig. 1 -3의 7-link Baranov truss에서 링크 3개를 제거함으로써 유도될 수 있다. Fig. 1 -3에서, Stephenson과 watt 기구는 7-link Baranov truss에서 링크 1개를 제거함으로써 유도된다. Fig. 1 -2와 Fig. 1 -3에서, 슬라이딩 기구는 대응 링크기구의 회전관절을 미끄럼 관절로 대체함으로써 유도된다. 여기에서, 대체되는 회전관절의 위치 또는 개수에 의해서 다양한 슬라이딩 기구가 파생된다.

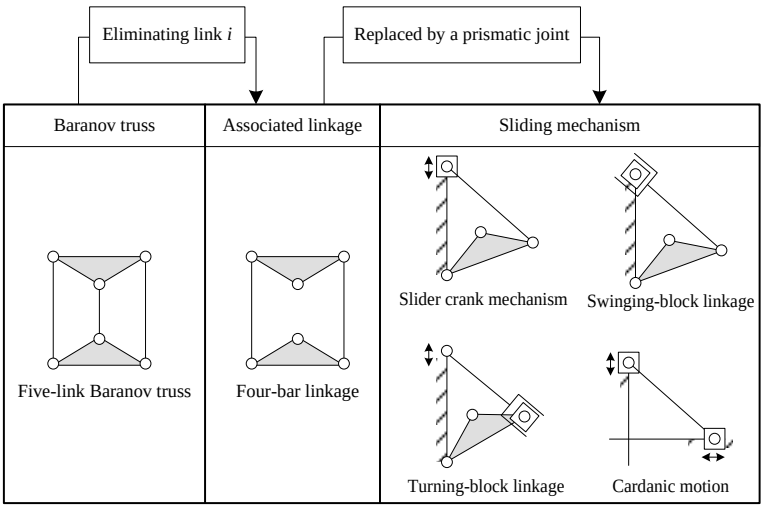


Fig. 1 -2. Relationship of between the five-link Baranov truss and mechanisms [35].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

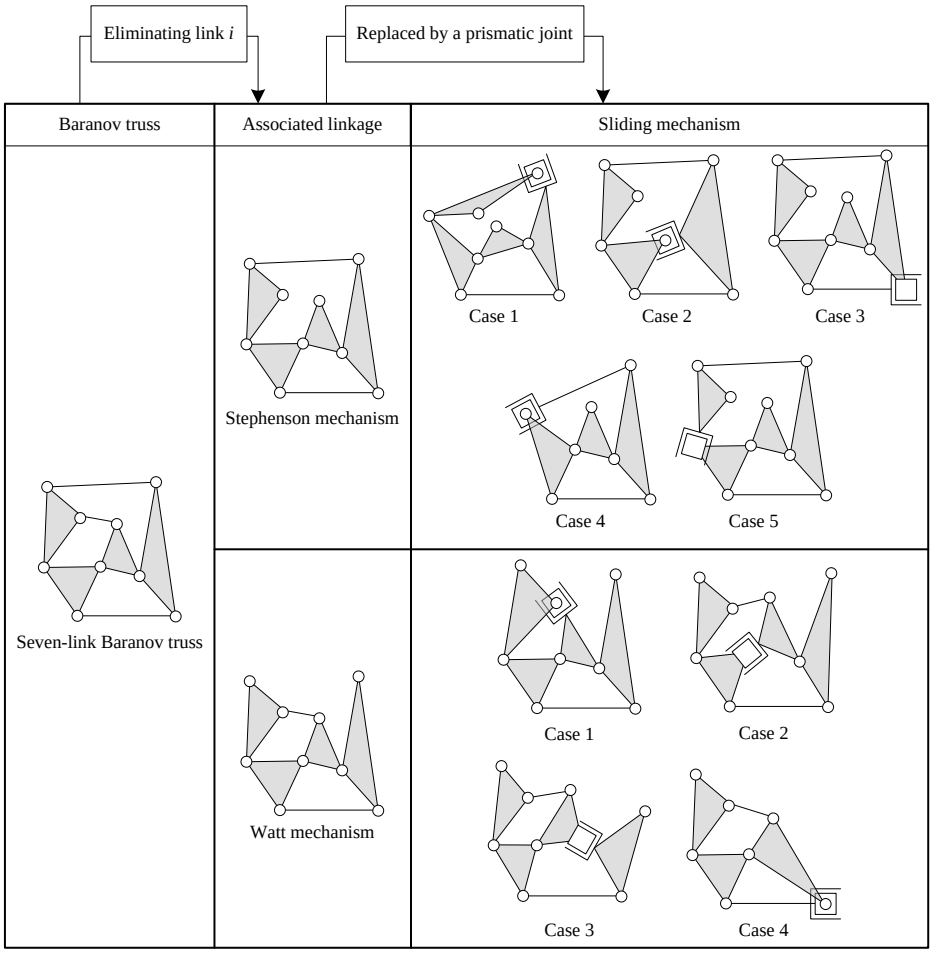


Fig. 1 -3. Relationship of between the seven-link Baranov truss and mechanisms [34].

Baranov truss의 중력보상기에 [32, 33]의 설계방법(대응 링크기구의 중력보상기를 변환하여 슬라이딩 기구의 중력보상기를 설계)을 적용한다. Baranov truss의 운동성은 영(zero)이므로, Baranov truss의 중력보상기는 이론적으로만 활용한다. Baranov truss의 링크가 제거될 때, 중력토크 계산과정에서 링크의 질량과 링크에서 관절들이 무시될 수 있다. 제거되는 링크의 질량은 중력토크 항에서 영(zero)으로 설정된다. 또한, 제거되는 링크에 부착된 관절들은 기구학 계산시 무시된다. 따라서, 기구학 계산시 고려해야 하는 관절공간이 축소된다. 그러므로, 관절공간의 축소가 발생

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

할 경우에 사용할 수 있는 삭제규칙 [32, 33]이 적용 가능하다. 즉, Baranov truss의 중력보상기에서 대응 링크기구와 슬라이딩 기구들에 대한 중력보상기가 유도될 수 있다. 본 연구에서는 완전 중력보상만을 고려하며, 설계 예로서 [37]의 5-link와 7-link Baranov truss를 사용한다. 삭제규칙은 5-link 그리고 7-link Baranov truss에 대한 중력보상기들에게 적용하여 4절 링크기구, Stephenson 기구 그리고 watt 기구에 대한 중력보상기를 유도한다. 슬라이딩 기구에 대한 중력보상기는 대응 링크기구 (즉, 4절 링크기구, Stephenson 기구 그리고 Watt 기구)에 대한 중력보상기에 삭제규칙을 다시 적용하여 유도한다. 5-link Baranov truss의 중력보상기에 삭제규칙을 적용하여 대응링크기구(4-절 링크기구) 및 슬라이딩 기구(슬라이더 크랭크)를 얻는 과정을 Fig. 1 -4에 나타냈다.

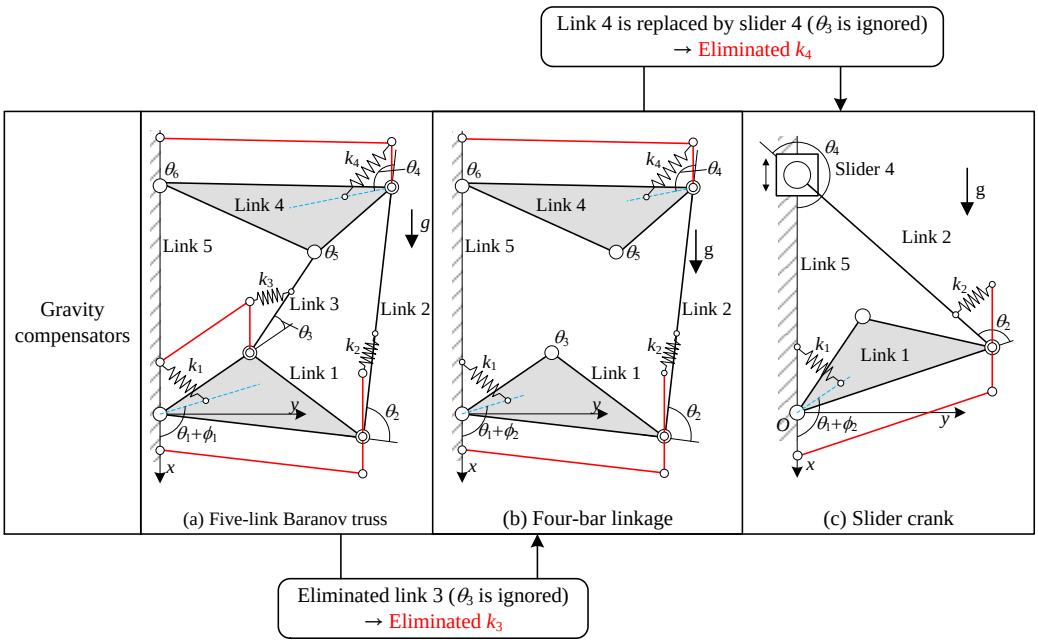


Fig. 1 -4. The transformation process of gravity compensators.

5-link Baranov truss의 중력보상기에서 단위 중력보상기 k_3을 제거하여, 4절 링크

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기구의 중력보상기를 유도한다. 4절 링크기구의 중력보상기에서 단위 중력보상기 k_4를 제거하여, 슬라이더 크랭크의 중력보상기를 유도한다. 즉, 대응 링크기구와 슬라이딩 기구의 중력보상기는 Baranov truss의 중력보상기로부터 유도할 수 있다. 유도 과정에서, 이전 연구[25-31]와 달리 각각의 대응 링크기구와 슬라이딩 기구에 대한 기구학적 해석과 포텐셜 에너지 계산을 수행하지 않는다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 중력보상기 설계 방법인 공간사상기법에 대해서 간략히 설명한다. 3장에서는 Baranov truss와 파생기구 사이 관계를 설명하고, 중력토크 관점에서 관찰된 변형규칙과 삭제규칙을 소개한다. 4장은 5-link와 7-link Baranov trusses의 중력보상기를 설계한다. 5장은 4장에 제시된 Baranov truss의 중력보상기에서 다양한 파생기구의 중력보상기를 제안된 방법으로 유도한다. 6장은 5장에서 설계된 중력보상기들에 대해서 모의실험을 수행한다. 7장에서는 6장에서 검증된 모델을 제작하여 이번 논문에서 제안한 설계방법을 검증하고, 8장에선 모의실험 및 실험결과에 대해 토의한다. 마지막으로 9장에서 결론을 기술한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 공간 사상 기법

중력보상기 설계는 중력토크에 대한 관절공간과 보상토크에 대한 중력보상기 공간 사이의 사상으로 설명될 수 있다. 사상행렬은 해당기구에 관하여 단위 중력보상기의 기계적 연결을 나타낸다. 공간사상 기반의 설계방법 [31]을 본 장에 간단하게 소개하였다.

제 1 절 공간 사상

관절공간이 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n]^T \in R^{n\times 1}$ 라고 할 때, 여기서 θ_i는 i^{th} 관절의 회전각도를 의미하고 n은 관절의 수를 나타낸다. 간단한 해석을 위해서 중력보상기 공간은 1자유도 중력보상기로만 구성되어 있다고 가정한다. 이때 중력보상기 공간은 $\Theta_g = [\theta_{g1}, \theta_{g2}, \cdots, \theta_{gm}]^T \in R^{m\times 1}$ 이라고 결정할 수 있다. 여기서 θ_{gi} 는 i^{th} 중력보상기의 회전각도를 의미하며 m은 1자유도 중력보상기의 개수를 나타낸다.

중력보상기의 회전각도는 기구의 움직임에 의해서 수동적으로 결정된다. 즉, 관절공간과 중력보상기 공간 사이에는 함수 관계가 존재한다. Θ_g와 Θ사이에 아래와 같은 선형 관계를 가정한다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} \tag{1}$$

여기서 $\mathbf{J} \in R^{m\times n}$ 과 $\boldsymbol{\phi} \in R^{m\times 1}$ 이다. $\mathbf{J}$는 관절공간 Θ와 중력보상기 공간 Θ_g 사이에서 사상행렬을 의미하며, $\boldsymbol{\phi}$ 는 일정한 위상각의 벡터를 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 두 공간에서의 포텐셜 에너지

링크질량 m_i에 대한 포텐셜 에너지는 아래와 같이 계산한다:

$$V_m = -\sum_{i=1}^{n} m_i \mathbf{g} \cdot {}^0\mathbf{P}_i \tag{2}$$

여기서, $\mathbf{g}$는 중력벡터이고 ${}^0\mathbf{P}_i$는 {0} 프레임에 대한 링크 i의 COM(Center of mass) 위치를 나타낸다. ${}^0\mathbf{P}_i$는 $[{}^0\mathbf{P}_i; 1] = {}^0\mathbf{T}_i[{}^i\mathbf{P}_i; 1]$으로부터 계산되며, ${}^0\mathbf{T}_i = {}^0\mathbf{T}_1{}^1\mathbf{T}_2 \cdots {}^{i-1}\mathbf{T}_i$는 변형행렬을 의미한다. ${}^0\mathbf{T}_i$는 관절공간 Θ에 의해서 결정되기 때문에, 식 (2)는 관절공간에서의 포텐셜 에너지를 나타낸다.

중력보상기 공간에서의 포텐셜 에너지를 계산한다. 이번 연구에서 1자유도 중력보상기가 사용되며[11], Fig. 2 -1과 같다. 스프링의 한 끝점은 고정된 지면에서 점 A에 붙여지며, 다른 끝점은 링크에 점 B에 부착된다. 점 A (또는 B)는 원점 O으로부터 거리 h (또는 b) 만큼 위치한다. Fig. 2 -1에서 k는 zero-length 스프링이며, 변형길이가 영일 때 초기길이가 영이다. zero-length 스프링의 실제 구현을 위해서, 점 A와 점 B 사이를 와이어로 서로 연결하고, 스프링은 고정된 지면이나 링크에 설치된다. [20]에 zero-length 스프링의 자세한 구현설명이 있다.

스프링의 포텐셜 에너지는 $V_k(\theta) = kS^2(\theta)/2 = C + kbh\cos\theta$으로 계산되며, $C = k(h^2 + b^2)/2$이다. k와 S는 각각 스프링상수와 스프링 변형길이를 의미한다. 중력보상기 공간에서 포텐셜 에너지 식 (3)을 유도한다:

$$V_k = \sum_{j=1}^{m} C_j + k_j b_j h_j \cos(\theta_{gj}) \tag{3}$$

여기서, $C_j = k_j(h_j^2 + b_j^2)/2$이며, h_j, b_j 그리고 k_j는 j^{th} 중력보상기의 파라미터이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

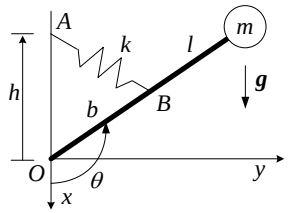


Fig. 2 -1. A 1-DOF gravity compensator [11].

제 3 절 설계 방정식

관절공간과 중력보상기 공간의 총 포텐셜 에너지가 $V(\Theta,\Theta_g) = V_m(\Theta) + V_k(\Theta_g) =$ 일정할 때, 완전한 중력보상이 이루어 진다. $\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi}$ 이므로, $V(\Theta,\Theta_g)$은 $V(\Theta) = V_m(\Theta) + V_k(\mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi})$이 된다. $V(\Theta)$을 θ_i에 대해 편미분하여 행렬로 정리하면 아래의 설계 방정식을 얻을 수 있다:

$$\mathbf{f}(\Theta)\mathbf{V}_{m_\max} - \mathbf{J}^T\mathbf{MK} = \mathbf{0} \tag{4}$$

여기서, $\mathbf{f}(\Theta) \in R^{n\times n}$ 과 $V_{m_\max} = [V_{m1}, V_{m2},\cdots, V_{mn}]^T \in R^{n\times 1}$이다. V_{mj}는 관절 j에서 측정된 관절공간의 최대 포텐셜 에너지이며 상수 이다. $f_{ij}(\Theta)$는 주어진 매니퓰레이터의 자세 변경 시 (예, 회전각도 변화) 변화하는 값으로 자세에 대한 V_{mj}의 변화율을 의미한다. 또한, $\mathbf{M}$과 $\mathbf{K}$는 각각 $\mathbf{M} = diag[\sin(\mathbf{J}_1\Theta + \phi_1), \sin(\mathbf{J}_2\Theta + \phi_2),\cdots, \sin(\mathbf{J}_m\Theta + \phi_m)] = diag[\sin(\theta_{g1}), \sin(\theta_{g2}),\cdots, \sin(\theta_{gm})] \in R^{m\times m}$와 $\mathbf{K} = [k_1b_1h_1, k_2b_2h_2,\cdots, k_mb_mh_m]^T \in R^{m\times 1}$이다. 여기서 $diag[x_1,\cdots, x_n]$은 $n\times n$ 대각선행렬을 의미한다. 그리고 $\mathbf{J}^T$는 $\mathbf{J}$의 전치행렬을 의미한다(즉, $\mathbf{J}^T \in R^{n\times m}$). $\mathbf{M}$에서 사인함수는 식 (3)의 중력보상기 공간에서 포텐셜 에너지의 편미분에서부터 비롯된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 사상행렬의 결정

공간사상 기법을 활용한 중력보상기 설계목표는 사상행렬 **J**를 결정하는 것이다. **J**의 열 벡터 수는 단위 중력보상기의 개수를 의미한다. **J**의 각 열 벡터는 단위 중력보상기의 위치(또는 기구학적 제약조건)를 나타낸다. 즉, **J**의 결정으로 단위 중력보상기의 개수와 위치를 동시에 결정할 수 있다.

주어진 기구의 특징을 에너지 관점에서 관찰한다. $\mathbf{f}(\Theta)$가 각 자세 또는 특정 관절공간 각도에서의 에너지 변화 비율을 의미하므로, $\mathbf{f}(\Theta)$의 고윳값은 질량에 대한 포텐셜 에너지의 특징을 나타낸다. $\mathbf{f}(\Theta)$의 고윳값이 $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n]^T \in R^{n\times 1}$이라고 한다. 만약, 단위 중력보상기의 함수로 λ_i를 표현 할 수 있다면, 단위 중력보상기 함수는 λ_i의 기저함수가 되고 안전한 중력 보상이 가능해 진다.

이번 연구에서 중력보상기 공간을 오직 1자유도 중력보상기로 구성했기 때문에 중력보상기 공간은 오직 간단한 사인함수로 표현된다 (예 **M**). 이러한 상항에서, 기저함수는 중력보상기 공간의 구성요소인 사인함수로서 선택된다. λ_i를 식 (5)과 같이 사인함수로 분해한다(즉, 기저함수):

$$\lambda_i(\Theta) = \sum_{j=1}^{m} d_{ij} \sin(\theta_{gj}) = \sum_{j=1}^{m} d_{ij} \sin(\mathbf{J}_j \Theta + \phi_j) \tag{5}$$

여기서, d_{ij}은 임의의 실수 값이다. m은 단위 중력보상기 개수이며 $\mathbf{J}_j = [J_{j1}, J_{j2}, \cdots, J_{jn}] \in R^{1\times n}$은 j번째 **J**의 열 벡터를 나타낸다. 즉, 사상행렬 **J**는 중력보상기 공간에서 구성요소와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 고윳값을 분해함으로써 간단하게 얻는다. 예를 들어 $\lambda_1 = \sin(\theta_1)\cos(\theta_2)$ 가정하자. λ_1은 사인함수에 관해서 $\lambda_1 = (\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(\theta_1 - \theta_2))/2$로서 분해된다. 이 상황에서 $m = 2$, $\mathbf{J}_1 = [1, 1]$, $\mathbf{J}_2 = [1, -1]$이며 $j = 1, 2$ 동안 $\phi_j = 0$이다. **J**의 열 벡터와 $\mathbf{J}_j$는 관절공관과 단위 중력보상기 사이의 기구학적 제한조건을 나타낸다. 즉, 스프링의

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

구체적인 장착위치는 이 방법으로 결정되지 않지만 제약조건을 만족하는 다양한 설계가 가능하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 변환 설계방법

제 1 절 Baranov truss와 파생기구 사이의 관계

기구합성은 설계목적에 적합한 기구를 설계하기 위해서 종종 사용된다. 대응 링크기구 개념은 회전관절로만 이루어진 1-dof basic closed kinematic chain을 이용하여, 설계자가 원하는 기구를 얻기 위해서 회전관절을 다른 kinematic pair로 수정한다 [34]. 예를 들어 4절 링크기구의 회전관절을 미끄럼 관절로 변경할 때, 4절 링크기구에서 슬라이더 크랭크가 유도될 수 있다. 이때, 4절 링크기구는 대응 링크기구에 해당한다. 또한, 트러스의 링크를 제거하면 운동 가능한 링크기구가 유도된다. 이전 연구에서 Baranov truss는 링크기구 또는 kinematic chain을 얻는데 사용되었다[36].

본 연구에서는 1자유도 링크기구를 고려하므로, 트러스에서 binary link만 제거한다. 이번 장에서는 Baranov truss 개념과 대응 링크기구 개념을 조합하여, Baranov truss에서 대응 링크기구와 슬라이딩 기구의 중력보상기가 유도되는 과정을 설명한다.

제 2 절 변형규칙

중력토크 계산 관점으로, Baranov truss에서 슬라이딩 기구가 유도되는 과정에서 파라미터와 회전관절의 변화를 관찰한다. Baranov truss와 대응 링크기구 사이의 관계를 고려하면, Baranov truss에서 링크 i가 제거될 때, 동시에 l_i, l_{ig} 그리고 m_i는 영으로 설정되며, 제거된 링크의 회전관절들은 무시된다. 즉, 관절공간의 축소가 발생한다. 대응 링크기구를 슬라이딩 기구로 변형 시, 대응 링크기구의 회전관절

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

θ_k가 미끄럼 관절로 대체된다. 이 경우 관절공간은 축소되며, 링크 k는 슬라이더로 변경된다. 여기서, 슬라이더 j가 질량중심에 대한 offset을 가지지 않을 때, 슬라이더의 질량 m_j는 회전관절로 연결된 인접한 링크에 병합되며, l_j와 l_{jg}는 무시된다. 반대로, 슬라이더 j가 질량중심에 대한 offset을 가질 때, 슬라이더 j의 질량 m_j는 회전관절로 연결된 인접한 링크에 병합되지 않으며, l_j와 l_{jg}는 무시되지 않는다. 모든 기구에서 항상, 고정링크의 질량은 고려되지 않는다.

중력토크 관점에서 Baranov truss부터 슬라이딩 기구까지, 중력토크 계산에 필요한 파라미터와 회전관절에 대한 변형규칙을 다음과 같이 요약한다:

1. 고정링크에 대한 질량은 고려되지 않는다.
2. 대응 링크기구의 링크 i가 질량중심의 offset을 가지지 않는 슬라이더로 될 때, l_i와 l_{ig}는 영이다. 기구의 링크 i가 제거될 때, l_i와 l_{ig} 값은 영이다. 이외에 l_i와 l_{ig}는 무시할 수 없다.
3. 질량중심의 offset을 가지지 않는 슬라이더의 질량 m_i는 회전관절로 연결된 인접한 링크로 병합된다. m_i가 고정링크에 병합될 때, m_i는 무시한다. 질량중심의 offset을 가지는 m_i는 무시될 수 없다.
4. 모든 질량의 위치를 계산하기 위해 필요하지 않는 관절각도는 무시된다. 회전관절 i가 미끄럼 관절로 대체되고 모든 질량의 위치에 대한 계산이 요구될 때, 회전관절 i의 회전각도는 슬라이더의 운동방향을 나타내는 상수 각도가 된다. 기구의 링크 i가 제거될 때, 모든 파라미터 (즉, l_i, l_{ig} 그리고 m_i)와 θ_i는 영이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 삭제규칙

설계 방정식에 변형규칙을 적용한다. 관절공간 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n]^T \in R^{n\times 1}$을 가지는 Baranov truss와 설계방정식을 만족하는 Baranov truss에 대한 중력보상기가 존재한다고 가정하자. 즉, 사상행렬 **J**는 결정되었다. Baranov truss의 회전관절 θ_i가 무시되어 관절공간이 축소될 때, Baranov truss에 대한 사상행렬 **J**의 i^{th} 열 벡터와 i^{th} 행 벡터가 제거된다. 설계방정식에서 $\mathbf{f}(\Theta)$의 i^{th} 행 벡터는 θ_i에 의한 포텐셜 에너지의 편미분을 나타낸다.

Baranov truss에서 링크가 제거될 때, 링크의 파라미터 l_i, l_{ig} 그리고 m_i는 영이 되므로, V_{mi}는 영이 된다. V_{mi}가 영일 때, $\mathbf{f}(\Theta)$의 i^{th} 열 벡터가 무시된다. 사상행렬 **J**의 i^{th} 열 벡터의 제거는 $\mathbf{J}^T$의 i^{th} 행 벡터의 삭제와 동일하다. $\mathbf{J}^T$의 i^{th} 행 벡터의 삭제가 발생할 때, K_i와 **M**의 i^{th} 열 벡터가 무시된다. **M**은 대각선 행렬이기 때문에, **M**의 i^{th} 행 벡터는 **M**의 i^{th} 열 벡터의 삭제에 의해 제거된다. 결과적으로, **M**의 i^{th} 행 벡터의 제거는 $\mathbf{J}^T$의 i^{th} 열 벡터를 삭제를 야기한다. 슬라이더가 질량중심에서 offset을 가지지 않을 때, 슬라이더의 링크 파라미터들은 영이 되며 (즉, binary link가 슬라이더가 될 때), 슬라이더의 질량은 인접한 링크에 병합되어 V_{mi}는 영이 된다. 슬라이더가 질량중심에서 offset을 가질 때 (즉, ternary link (or quaternary link and pentagonal link etc.))가 슬라이더가 될 때), 슬라이더의 링크 파라미터들은 고려되어야 하므로, $V_{m_max,i}$는 영(zero)이 아니다. 변형규칙에 의해서, 설계방정식의 행과 열 벡터들이 연속적으로 삭제된다. Fig. 3 -1은 설계방정식의 행과 열 벡터의 삭제과정을 나타낸다. 삭제규칙을 다음과 같이 요약한다:

1. 관절공간이 감소됨으로써, $\mathbf{J}^T$의 i^{th} 행 벡터들 삭제한다.
2. 1번에 의해서, i^{th} 열과 행 벡터들을 제거한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 2번에 의해서, K_i을 삭제한다.

4. 2번에 의해서, $\mathbf{J}^T$의 i^{th} 열 벡터를 제거한다.

5. 관절공간이 감소됨으로써, $\mathbf{f}(\Theta)$의 i^{th} 행 벡터를 제거한다.

6. 슬라이더 i 또는 링크 i의 파라미터가 영(zero)일 때, $V_{m_\max,i}$를 제거한다. 슬라이더 i의 질량은 회전관절을 가진 인접한 링크에 병합된다.

7. 6번에 의해서, $\mathbf{f}(\Theta)$의 i^{th} 열 벡터를 제거한다.

8. 질량중심이 offset인 링크가 슬라이더로 될 때, 인접한 요소들은 원래의 요소들의 병합된 값으로 대체된다. 원래의 설계방정식에서 인접한 요소와 병합되는 요소의 선택은 삭제규칙 1번과 5번의 결과에 의해서 이루어진다.

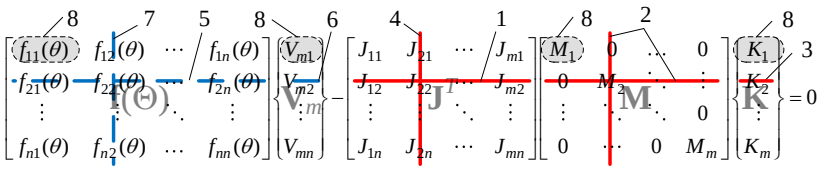


Fig. 3 -1. A new design equation from the design equation of an associated linkage.

$\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 k^{th} 행 벡터가 관절공간의 축소에 의해서 제거된다고 가정하자. $\mathbf{J}^T$의 k-1th와 k^{th} 열 벡터가 동일할 때, $f_{(k-1),(k-1)}$, $V_{m_\max,k-1}$, $M_{(k-1),(k-1)}$ 그리고 K_{k-1}가 인접한 요소로 선택된다. 이때, k에 대한 요소와 인접한 요소들은 병합된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

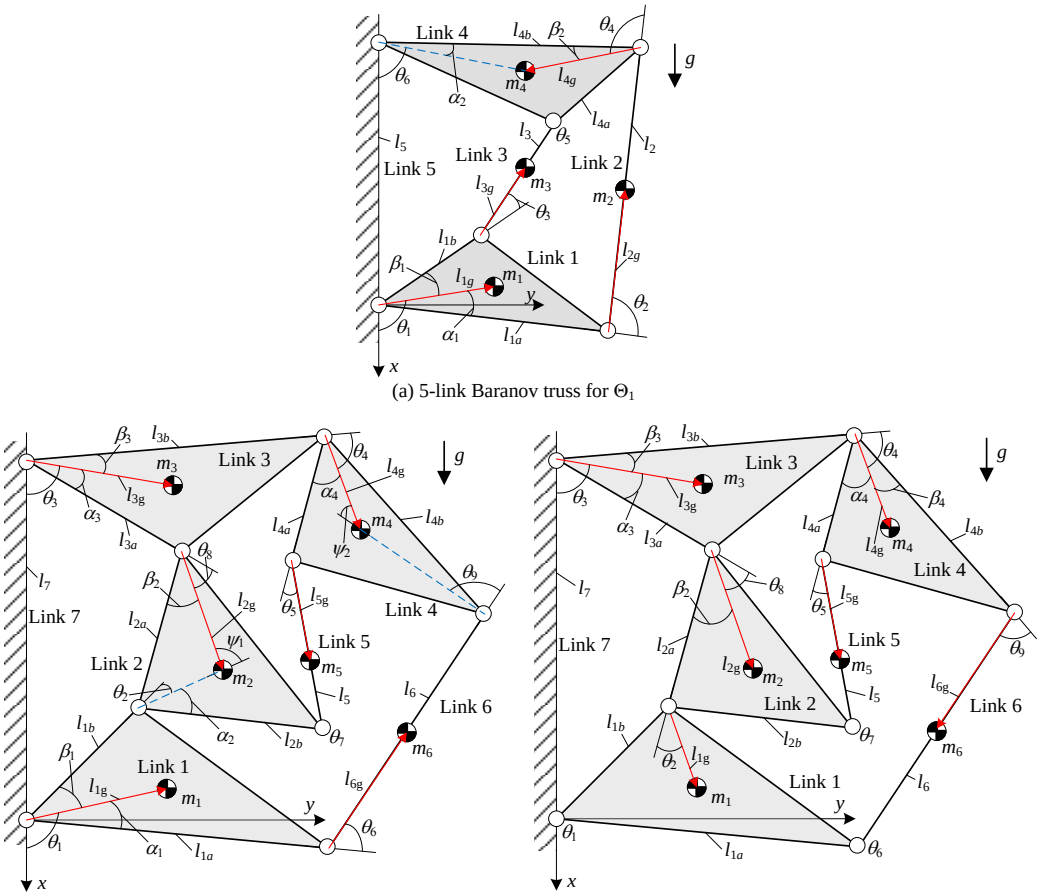
제 4 장 Baranov truss의 중력보상기 설계

본 장에서는 공간 사상 기법을 사용하여, 5-link와 7-link Baranov trusses의 중력보상기를 설계한다. 4장 1절에서 관절공간 Θ_1으로 5-link Baranov truss의 중력보상기에 대한 설계방정식을 계산한다. 4장 2절은 Θ_1의 대체 관절공간 (즉, $\Theta_{1,a}$)을 결정하여, $\Theta_{1,a}$으로 5-link Baranov truss의 중력보상기에 대한 설계방정식을 계산한다. 4장 3절과 4절은 각각 관절공간 Θ_2와 Θ_3으로 7-link Baranov truss의 중력보상기에 대한 설계 방정식을 계산한다. 4장 5절은 각 절에서 계산한 설계 방정식을 통해서, 5-link와 7-link Baranov trusses에서 1자유도 단위 중력보상기를 위치 및 개수를 결정하여 설계한다.

Fig. 4 -1은 Baranov trusses를 나타낸다[37]. Fig. 4 -1(a)는 5-link Baranov truss이며, Fig. 4 -1(b)-(c)는 7-link Baranov truss이다. Fig. 4 -1(a) (또는 Fig. 4 -1(b)-(c))에서 link 5 (또는 link 7)가 고정 링크이다. Fig. 4 -1(a)의 경우, 질량 m_1, m_2, m_3 그리고 m_4의 위치를 계산하기 위해서는 6개 회전관절 중에서 4개를 선택해야 한다. Fig. 4 -1(b)-(c) 7-link Baranov truss에서 각 링크 질량의 위치를 계산하기 위해서는 9개 회전관절 중에서 6개를 선택해야 한다. 관절공간은 각각 $\Theta_1 = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$, $\Theta_2 = [\theta_1, \theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$와 $\Theta_3 = [\theta_2, \theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_9]^T$ 이다. Fig. 4 -1에서 중력은 $\mathbf{g} = g[c_\gamma, s_\gamma]^T$ 이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 5-link Baranov truss for Θ_1

(b) 7-link Baranov truss for Θ_2

(c) 7-link Baranov truss for Θ_3

Fig. 4 -1. Baranov trusses [37].

제 1 절 Θ_1에 대한 5-link Baranov truss

$\Theta_1 = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$을 활용하여, Fig. 4 -1(a) 5-link Baranov truss에서 질량 m_1, m_2, m_3 그리고 m_4에 대한 위치벡터를 계산한다:

$$ {}^5\mathbf{P}_1 = l_{1g}[c_1, s_1]^T \tag{6} $$

$$ {}^5\mathbf{P}_2 = l_{1a}[c_{1+\alpha_1}, s_{1+\alpha_1}]^T + l_{2g}[c_{1+2+\alpha_1}, s_{1+2+\alpha_1}]^T \tag{7} $$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$ {}^{5}\mathbf{P}_3 = l_{1b}[c_{1+\beta_1}, s_{1+\beta_1}]^T + l_{3g}[c_{1+3+\beta_1}, s_{1+3+\beta_1}]^T \tag{8} $$

$$ {}^{5}\mathbf{P}_4 = l_{1a}[c_{1+\alpha_1}, s_{1+\alpha_1}]^T + l_2[c_{1+2+\alpha_1}, s_{1+2+\alpha_1}]^T + l_{4g}[c_{1+2+4+\alpha_1}, s_{1+2+4+\alpha_1}]^T \tag{9} $$

여기서, c_1 (또는 s_1)과 c_{1+2} (또는 s_{1+2})은 각각 $\cos(\theta_1)$ (또는 $\sin(\theta_1)$)과 $\cos(\theta_1 + \theta_2)$ (또는 $\sin(\theta_1 + \theta_2)$)을 의미한다. 식 (2)을 이용하여, 모든 질량의 포텐셜 에너지 (또는 관절 공간 Θ_1에서 포텐셜 에너지)를 계산한다:

$$ \begin{aligned} V_m &= -\sum_{i=1}^{n=4} m_i \mathbf{g} \cdot \mathbf{P}_i \\ &= -C_1 c_{1+\phi_1} - g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) c_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} - g m_3 l_{3g} c_{1+3+(\beta_1-\gamma)} - g m_4 l_{4g} c_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \end{aligned} \tag{10} $$

여기서, $C_1 = sqrt(A_1^2 + B_1^2)$, $\phi_1 = \tan^{-1}(B_1/A_1)$, $A_1 = g m_1 l_{1g} c_\gamma + g(m_2 + m_4) l_{1a} c_{\alpha 1-\gamma} + g m_3 l_{1b} c_{\beta 1-\gamma}$ 그리고 $B_1 = -g m_1 l_{1g} s_\gamma + g(m_2 + m_4) l_{1a} s_{\alpha 1-\gamma} + g m_3 l_{1b} s_{\beta 1-\gamma}$ 이다. 이때, 식 (10)을 편미분 한다:

$$ \begin{aligned} \partial V_m / \partial \theta_1 &= C_1 s_{1+\phi_1} + g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} \\ &\quad + g m_3 l_{3g} s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} + g m_4 l_{4g} s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_2 &= g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} + g m_3 l_{3g} s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} + g m_4 l_{4g} s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_3 &= g m_3 l_{3g} s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} + g m_4 l_{4g} s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_4 &= g m_4 l_{4g} s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \end{aligned} \tag{11} $$

식 (11)을 행렬식으로 정리하여, 식 (4)의 $\mathbf{f}(\Theta)\mathbf{V}_{m_\max}$으로 표현한다:

$$ \begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) \\ g m_3 l_{3g} \\ g m_4 l_{4g} \end{Bmatrix} = \mathbf{f}(\Theta)\mathbf{V}_{m_\max} \tag{12} $$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (12)에서 **f**(Θ)에 대한 고윳값은 식 (13)으로 계산된다:

$$\boldsymbol{\lambda} = [s_{1+\phi_1}, s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)}, s_{1+3+(\beta_1-\gamma)}, s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)}]^T \tag{13}$$

식 (4)에서 **M**의 구성요소 **λ**는 간단한 사인함수를 취한다. 식 (5)를 참고하면, m = 4, $\mathbf{J}_1$ = [1, 0, 0, 0], $\mathbf{J}_2$ = [1, 1, 0, 0], $\mathbf{J}_3$ = [1, 0, 1, 0], $\mathbf{J}_4$ = [1, 1, 0, 1], $\boldsymbol{\phi}_1 = \phi_1$, $\boldsymbol{\phi}_2 = \boldsymbol{\phi}_4 = \alpha_1-\gamma$ 그리고 $\boldsymbol{\phi}_3 = \beta_1-\gamma$ 이다. 식 (1)과 같이, Fig. 4 -1(a)의 Θ_1과 Θ_g 사이의 관계를 사상행렬과 위상각을 사용하여 식 (14)와 같이 표현한다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta_1 + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \alpha_1-\gamma \\ \beta_1-\gamma \\ \alpha_1-\gamma \end{Bmatrix} \tag{14}$$

M과 **K**는 각각 $\mathbf{M} = diag[s_{1+\phi 1}, s_{1+2+(\alpha 1-\gamma)}, s_{1+3+(\beta 1-\gamma)}, s_{1+2+4+(\alpha 1-\gamma)}] \in R^{4\times 4}$와 $\mathbf{K} = [k_1b_1h_1, k_2b_2h_2, k_3b_3h_3, k_4b_4h_4]^T \in R^{4\times 1}$ 이다. 식 (12), **M**, **K** 그리고 식 (14)의 **J**를 설계 방정식 (4)에 대입하여, Fig. 4 -1(a)의 중력보상기에 대한 설계 방정식을 유도한다:

$$\begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ g(m_2l_{2g} + m_4l_2) \\ gm_3l_{3g} \\ gm_4l_{4g} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \end{Bmatrix} = 0 \tag{15}$$

식 (15)에 의해서, 스프링 상수는 다음과 같이 결정된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$k_1 = C_1 / (b_1 h_1) \tag{16}$$
$$k_2 = g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) / (b_2 h_2) \tag{17}$$
$$k_3 = g m_3 l_{3g} / (b_3 h_3) \tag{18}$$
$$k_4 = g m_4 l_{4g} / (b_4 h_4) \tag{19}$$

제 2 절 Θ_1의 대체 관절공간

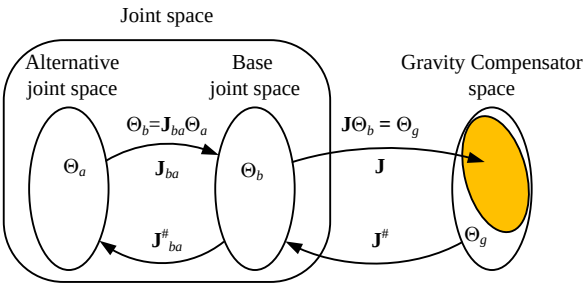


Fig. 4 -2. Relationships between the base and alternative joint space and gravity compensator space [32].

$\Theta_b \in R^{n\times1}$와 $\Theta_a \in R^{p\times1}$ 이라고 가정하자. 여기서, n과 p는 각각 기초 관절공간과 대체 관절공간에서 관절의 수를 나타낸다. 이때, 기초 관절공간과 대체 관절공간 사이의 사상은 식 (20)으로 결정된다:

$$\Theta_b = \mathbf{J}_{ba}\Theta_a \tag{20}$$

여기서, $\mathbf{J}_{ba} \in R^{p\times1}$는 기초 관절공간과 대체 관절공간 사이의 제약을 나타낸다. 식 (4)을 만족하는 Θ_b에 대한 k_i와 $\mathbf{J}$가 존재한다고 가정하자. 식 (20)을 설계 방정식 식 (4)에 적용하면 $\mathbf{f}(\mathbf{J}_{ba}\Theta_a)\mathbf{V}_{m_\max} - \mathbf{J}^T\mathbf{M}(\mathbf{J}\mathbf{J}_{ba}\Theta_a + \boldsymbol{\phi})\mathbf{K} = 0$이 유도된다. 이때, $\mathbf{J}_{ba}{}^T$을 곱하여 계산하면 식 (21)이 유도된다:

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\mathbf{J}_{ba}{}^{T}\mathbf{f}(\mathbf{J}_{ba}\Theta_a)\mathbf{V}_{m_\max} - (\mathbf{J}\mathbf{J}_{ba})^{T}\mathbf{M}(\mathbf{J}\mathbf{J}_{ba}\Theta_a + \boldsymbol{\phi})\mathbf{K} = 0 \tag{21}$$

Θ_b을 갖는 설계 방정식 (즉, (4))은 이미 만족했기 때문에, 식 (21)은 Θ_a에 상관없이 만족한다. 즉, $\mathbf{J}\mathbf{J}_{ba}$는 Θ_a에 대한 새로운 사상행렬을 나타낸다. Fig. 4 -2는 기초 관절공간과 대체 관절공간 그리고 중력보상기 공간 사이의 관계를 묘사한다. 그러므로, 해당기구의 관절공간과 중력보상기 공간 사이의 사상은 Θ_g = $\mathbf{J}\Theta_b + \boldsymbol{\phi}$과 Θ_g = $\mathbf{J}\mathbf{J}_{ba}\Theta_a + \boldsymbol{\phi}$ 으로 설명될 수 있다.

Fig. 4 -1(a)에서 회전관절 θ_6은 식 (22)으로 표현할 수 있다.

$$\theta_1 - \alpha_1 + \theta_2 + \theta_4 - \beta_2 = \pi + \theta_6 + \alpha_2 \tag{22}$$

식 (22)은 Fig. 4 -1(a)의 기구학적 제약을 나타낸다. 식 (22)을 식 (9)에 대입하여, m_4에 대한 위치벡터를 다시 정리한다:

$${}^{5}\mathbf{P}_4 = l_{1a}[c_{1+\alpha_1}, s_{1+\alpha_1}]^T + l_2[c_{1+2+\alpha_1}, s_{1+2+\alpha_1}]^T + l_{4g}[c_{6+(\pi+\beta_2+\alpha_2-\gamma)}, s_{6+(\pi+\beta_2+\alpha_2-\gamma)}]^T \tag{23}$$

식 (22)을 Θ_1에 고려하여, 대체 관절공간 집합 $\Theta_{1,a} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_6]^T$ 을 유도한다. Θ_1과 $\Theta_{1,a}$사이의 관계에 의해서, 사상행렬 $\mathbf{J}_{ba}$ = [1, 0, 0, 0; 0, 1, 0, 0; 0, 0, 1, 0; –1, –1, 0, 1]^T ∈ $R^{4\times4}$이 결정된다. 대체 관절공간과 중력보상기 공간 사이의 사상은 식 (24)으로 정리된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\mathbf{J}_{ba}\Theta_{1,a} + \boldsymbol{\phi}_{1,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_2 \\ \alpha_1 - \gamma \\ \beta_1 - \gamma \\ \pi + \alpha_2 + \beta_2 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{24}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (15)에서 **J**와 $\boldsymbol{\phi}$ 대신에, 식 (24)의 새로운 사상행렬 $\mathbf{JJ}_{ba}$과 위상각 $\boldsymbol{\phi}_{1,a}$을 대입하여 식 (21)을 유도한다:

$$\begin{bmatrix} s_{1+\phi_2} & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & 0 \\ 0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{6+(\pi+\alpha_2+\beta_2-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_2 \\ gm_2l_{2g} \\ gm_3l_{3g} \\ gm_4l_{4g} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{1+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{6+(\pi+\alpha_2+\beta_2-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \end{Bmatrix} = 0 \tag{25}$$

이때, 식 (23)에 의해서 식 (15)의 $V_{m_\max,1}$와 $V_{m_\max,2}$는 각각 C_2와 gm_2l_{2g}이여야 한다. 여기서, $C_2 = sqrt(A_2^2 + B_2^2)$, $\phi_2 = \tan^{-1}(B_2/A_2)$, $A_2 = gm_1l_{1g}c_\gamma + gm_2l_{1a}c_{\alpha1-\gamma} + gm_3l_{1b}c_{\beta1-\gamma}$ 그리고 $B_2 = -gm_1l_{1g}s_\gamma + gm_2l_{1a}s_{\alpha1-\gamma} + gm_3l_{1b}s_{\beta1-\gamma}$ 이다. 식 (25)을 기반으로, 스프링 상수를 결정한다:

$$k_1 = C_2 / (b_1h_1) \tag{26}$$
$$k_2 = gm_2l_{2g} / (b_2h_2) \tag{27}$$
$$k_3 = gm_3l_{3g} / (b_3h_3) \tag{28}$$
$$k_4 = gm_4l_{4g} / (b_4h_4) \tag{29}$$

제 3 절 Θ_2에 대한 7-link Baranov truss

$\Theta_2 = [\theta_1, \theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$을 활용하여, Fig. 4 -1(b) 7-link Baranov truss에서 질량 m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 그리고 m_6에 대한 위치벡터를 계산한다:

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$ {}^{7}\mathbf{P}_1 = l_{1g}[c_1, s_1]^T \tag{30} $$

$$ {}^{7}\mathbf{P}_2 = l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3a}[c_{3+\alpha_3}, s_{3+\alpha_3}]^T + l_{2g}[c_{3+8+\alpha_3}, s_{3+8+\alpha_3}]^T \tag{31} $$

$$ {}^{7}\mathbf{P}_3 = l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3g}[c_3, s_3]^T \tag{32} $$

$$ {}^{7}\mathbf{P}_4 = l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3b}[c_{3+\beta_3}, s_{3+\beta_3}]^T + l_{4g}[c_{3+4+\beta_3}, s_{3+4+\beta_3}]^T \tag{33} $$

$$ \begin{aligned} {}^{7}\mathbf{P}_5 = {} & l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3b}[c_{3+\beta_3}, s_{3+\beta_3}]^T + l_{4a}[c_{3+4+(\beta_3+\alpha_4)}, s_{3+4+(\beta_3+\alpha_4)}]^T \\ & + l_{5g}[c_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4)}, s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4)}]^T \end{aligned} \tag{34} $$

$$ {}^{7}\mathbf{P}_6 = l_{1a}[c_{1+\alpha_1}, s_{1+\alpha_1}]^T + l_{6g}[c_{1+6+\alpha_1}, s_{1+6+\alpha_1}]^T \tag{35} $$

식 (2)을 이용하여, 모든 질량의 포텐셜 에너지 (또는 관절공간 Θ_2에서 포텐셜 에너지)를 계산한다:

$$ \begin{aligned} V_m &= -\sum_{i=1}^{n=6} m_i \mathbf{g} \cdot \mathbf{P}_i \\ &= -C_1 c_{1+\phi_1} - g m_2 l_{2g} c_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} - C_2 c_{3+\phi_2} - C_3 c_{3+4+\phi_3} \\ &\quad - g m_5 l_{5g} c_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} - g m_6 l_{6g} c_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} - g(m_2+m_3+m_4+m_5) l_7 c_\pi \end{aligned} \tag{36} $$

여기서, $C_i = sqrt(A_i^2 + B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$, $A_1 = gm_1 l_{1g} c_\gamma + gm_6 l_{1a} c_{\alpha 1-\gamma}$, $B_1 = -gm_1 l_{1g} s_\gamma + gm_6 l_{1a} s_{\alpha 1-\gamma}$, $A_2 = gm_3 l_{3g} c_\gamma + gm_2 l_{3a} c_{\alpha 3-\gamma} + g(m_4+m_5) l_{3b} c_{\beta 3-\gamma}$, $B_2 = -gm_3 l_{3g} s_\gamma + gm_2 l_{3a} s_{\alpha 3-\gamma} + g(m_4+m_5) l_{3b} s_{\beta 3-\gamma}$, $A_3 = gm_4 l_{4g} c_{\beta 3-\gamma} + gm_5 l_{4a} c_{\beta 3+\alpha 4-\gamma}$ 그리고 $B_3 = gm_4 l_{4g} s_{\beta 3-\gamma} + gm_5 l_{4a} s_{\beta 3+\alpha 4-\gamma}$ 이다. 이때, 식 (36)을 편미분 한다:

$$ \begin{aligned} \partial V_m / \partial \theta_1 &= C_1 s_{1+\phi_1} + g m_6 l_{6g} s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_8 &= g m_2 l_{2g} s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_3 &= C_2 s_{3+\phi_2} + g m_2 l_{2g} s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} + C_3 s_{3+4+\phi_3} + g m_5 l_{5g} s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_4 &= C_3 s_{3+4+\phi_3} + g m_5 l_{5g} s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_5 &= g m_5 l_{5g} s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} \\ \partial V_m / \partial \theta_6 &= g m_6 l_{6g} s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \end{aligned} \tag{37} $$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (37)을 정리하여, 식 (4)의 $\mathbf{f}(\Theta)\mathbf{V}_{m_\max}$으로 표현한다:

$$\begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ gm_2l_{2g} \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5l_{5g} \\ gm_6l_{6g} \end{Bmatrix} = \mathbf{f}(\Theta)\mathbf{V}_{m_\max} \quad (38)$$

식 (38)에서 $\mathbf{f}(\Theta)$에 대한 고윳값은 식 (39)으로 계산된다.

$$\boldsymbol{\lambda} = [s_{1+\phi_1}, s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)}, s_{3+\phi_2}, s_{3+4+\phi_3}, s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)}, s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)}]^T \quad (39)$$

식 (5)를 참고하면, $m = 6$, $\mathbf{J}_1 = [1, 0, 0, 0, 0, 0]$, $\mathbf{J}_2 = [0, 1, 1, 0, 0, 0]$, $\mathbf{J}_3 = [0, 0, 1, 0, 0, 0]$, $\mathbf{J}_4 = [0, 0, 1, 1, 0, 0]$, $\mathbf{J}_5 = [0, 0, 1, 1, 1, 0]$, $\mathbf{J}_4 = [1, 0, 0, 0, 0, 1]$, $\boldsymbol{\phi}_1 = \phi_1$, $\boldsymbol{\phi}_2 = \alpha_3-\gamma$, $\boldsymbol{\phi}_3 = \phi_2$, $\boldsymbol{\phi}_4 = \phi_3$, $\boldsymbol{\phi}_5 = \beta_3+\alpha_4-\gamma$ 그리고 $\boldsymbol{\phi}_6 = \alpha_1-\gamma$ 이다. 식 (1)과 같이, Fig. 4 -1(b)의 Θ_2과 Θ_g 사이의 관계를 사상행렬과 위상각을 사용하여 식 (40)와 같이 나타난다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta_2 + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \alpha_3-\gamma \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \beta_3+\alpha_4-\gamma \\ \alpha_1-\gamma \end{Bmatrix} \quad (40)$$

$\mathbf{M}$과 $\mathbf{K}$는 각각 $\mathbf{M} = diag[s_{1+\phi1}, s_{3+8+(\alpha3-\gamma)}, s_{3+\phi2}, s_{3+4+\phi3}, s_{3+4+5+(\beta3+\alpha4-\gamma)}, s_{1+6+(\alpha1-\gamma)}] \in R^{6\times6}$와 $\mathbf{K} = [k_1b_1h_1, k_2b_2h_2, k_3b_3h_3, k_4b_4h_4, k_5b_5h_5, k_6b_6h_6]^T \in R^{6\times1}$ 이다. 식 (38), $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$ 그리고 식 (40)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 **J**를 설계 방정식 (4)에 대입하여, Fig. 4 -1(b)의 중력보상기에 대한 설계 방정식 Fig. 4 -3을 유도한다. Fig. 4 -3에 의해서, 스프링 상수는 다음과 같이 결정된다:

$$k_1 = C_1 / (b_1 h_1) \tag{41}$$
$$k_2 = gm_2 l_{2g} / (b_2 h_2) \tag{42}$$
$$k_3 = C_2 / (b_3 h_3) \tag{43}$$
$$k_4 = C_3 / (b_4 h_4) \tag{44}$$
$$k_5 = gm_5 l_{5g} / (b_5 h_5) \tag{45}$$
$$k_6 = gm_6 l_{6g} / (b_6 h_6) \tag{46}$$

$$\begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ gm_2 l_{2g} \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5 l_{5g} \\ gm_6 l_{6g} \end{Bmatrix}$$
$$- \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{3+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1 b_1 h_1 \\ k_2 b_2 h_2 \\ k_3 b_3 h_3 \\ k_4 b_4 h_4 \\ k_5 b_5 h_5 \\ k_6 b_6 h_6 \end{Bmatrix} = 0$$

Fig. 4 -3. The design equation of Θ_2

제 4 절 Θ_3에 대한 7-link Baranov truss

$\Theta_3 = [\theta_2, \theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_9]^T$을 활용하여, Fig. 4 -1(c) 7-link Baranov truss에서 질량 m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 그리고 m_6에 대한 위치벡터를 계산한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$
\begin{aligned}
{}^{7}\mathbf{P}_1 &= l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3a}[c_{3+\alpha_3}, s_{3+\alpha_3}]^T \\
&\quad + l_{2a}[c_{3+8+(\alpha_3+\beta_2)}, s_{3+8+(\alpha_3+\beta_2)}]^T + l_{1g}[c_{2+3+8+(\alpha_3+\beta_2)}, s_{2+3+8+(\alpha_3+\beta_2)}]^T
\end{aligned} \tag{47}
$$

$$
{}^{7}\mathbf{P}_2 = l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3a}[c_{3+\alpha_3}, s_{3+\alpha_3}]^T + l_{2g}[c_{3+8+\alpha_3}, s_{3+8+\alpha_3}]^T \tag{48}
$$

$$
{}^{7}\mathbf{P}_3 = l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3g}[c_3, s_3]^T \tag{49}
$$

$$
{}^{7}\mathbf{P}_4 = l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3b}[c_{3+\beta_3}, s_{3+\beta_3}]^T + l_{4g}[c_{3+4+\beta_3}, s_{3+4+\beta_3}]^T \tag{50}
$$

$$
\begin{aligned}
{}^{7}\mathbf{P}_5 &= l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3b}[c_{3+\beta_3}, s_{3+\beta_3}]^T + l_{4a}[c_{3+4+(\beta_3+\alpha_4)}, s_{3+4+(\beta_3+\alpha_4)}]^T \\
&\quad + l_{5g}[c_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4)}, s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4)}]^T
\end{aligned} \tag{51}
$$

$$
\begin{aligned}
{}^{7}\mathbf{P}_6 &= l_7[c_\pi, s_\pi]^T + l_{3b}[c_{3+\beta_3}, s_{3+\beta_3}]^T + l_{4b}[c_{3+4+(\beta_3+\beta_4)}, s_{3+4+(\beta_3+\beta_4)}]^T \\
&\quad + l_{6g}[c_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4)}, s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4)}]^T
\end{aligned} \tag{52}
$$

식 (2)을 이용하여, 모든 질량의 포텐셜 에너지 (또는 Θ_3에서 포텐셜 에너지)를 계산한다.

$$
\begin{aligned}
V_m &= -\sum_{i=1}^{n=6} m_i \mathbf{g} \cdot \mathbf{P}_i \\
&= -gm_1 l_{1g} c_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} - C_1 c_{3+8+\phi_1} - C_2 c_{3+\phi_2} - C_3 c_{3+4+\phi_3} \\
&\quad - gm_5 l_{5g} c_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} - gm_6 l_{6g} c_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\
&\quad - g(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6) l_7 c_\pi
\end{aligned} \tag{53}
$$

여기서, $C_i = sqrt(A_i^2 + B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$, $A_1 = gm_2 l_{2g} c_{\alpha 3-\gamma} + gm_1 l_{2a} c_{\alpha 3+\beta 2-\gamma}$, $B_1 = gm_2 l_{2g} s_{\alpha 3-\gamma} + gm_1 l_{2a} s_{\alpha 3+\beta 2-\gamma}$, $A_2 = gm_3 l_{3g} c_\gamma + g(m_1+m_2) l_{3a} c_{\alpha 3-\gamma} + g(m_4+m_5+m_6) l_{3b} c_{\beta 3-\gamma}$, $B_2 = -gm_3 l_{3g} s_\gamma + g(m_1+m_2) l_{3a} s_{\alpha 3-\gamma} + g(m_4+m_5+m_6) l_{3b} s_{\beta 3-\gamma}$, $A_3 = gm_4 l_{4g} c_{\beta 3-\gamma} + gm_5 l_{4a} c_{\beta 3+\alpha 4-\gamma} + gm_6 l_{4b} c_{\beta 3+\beta 4-\gamma}$ 그리고 $B_3 = gm_4 l_{4g} s_{\beta 3-\gamma} + gm_5 l_{4a} s_{\beta 3+\alpha 4-\gamma} + gm_6 l_{4b} s_{\beta 3+\beta 4-\gamma}$ 이다. 이때, 식 (53)을 편미분 한다:

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$
\begin{aligned}
\partial V_m / \partial \theta_2 &= gm_1 l_{1g} s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} \\
\partial V_m / \partial \theta_8 &= gm_1 l_{1g} s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} + C_1 s_{3+8+\phi_1} \\
\partial V_m / \partial \theta_3 &= gm_1 l_{1g} s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} + C_1 s_{3+8+\phi_1} + C_2 s_{3+\phi_2} + C_3 s_{3+4+\phi_3} \\
&\quad + gm_5 l_{5g} s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} + gm_6 l_{6g} s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\
\partial V_m / \partial \theta_4 &= C_3 s_{3+4+\phi_3} + gm_5 l_{5g} s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} + gm_6 l_{6g} s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\
\partial V_m / \partial \theta_5 &= gm_5 l_{5g} s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} \\
\partial V_m / \partial \theta_9 &= gm_6 l_{6g} s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)}
\end{aligned}
\tag{54}
$$

식 (54)을 행렬식로 정리하여, 식 (4)의 $\mathbf{f}(\Theta)\mathbf{V}_{m_\max}$으로 표현한다:

$$
\mathbf{f}(\Theta)\mathbf{V}_{m_\max} =
\begin{bmatrix}
s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\
0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\
0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
gm_1 l_{1g} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5 l_{5g} \\ gm_6 l_{6g}
\end{Bmatrix}
\tag{55}
$$

식 (55)에서 $\mathbf{f}(\Theta)$에 대한 고윳값은 식 (39)으로 계산된다.

$$
\boldsymbol{\lambda} = [s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)}, s_{3+8+\phi_1}, s_{3+\phi_2}, s_{3+4+\phi_3}, s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)}, s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)}]^T \tag{56}
$$

식 (5)를 참고하면, $m = 6$, $\mathbf{J}_1 = [1, 1, 1, 0, 0, 0]$, $\mathbf{J}_2 = [0, 1, 1, 0, 0, 0]$, $\mathbf{J}_3 = [0, 0, 1, 0, 0, 0]$, $\mathbf{J}_4 = [0, 0, 1, 1, 0, 0]$, $\mathbf{J}_5 = [0, 0, 1, 1, 1, 0]$, $\mathbf{J}_4 = [0, 0, 1, 1, 0, 1]$, $\boldsymbol{\phi}_1 = \alpha_3+\beta_2-\gamma$, $\boldsymbol{\phi}_2 = \phi_1$, $\boldsymbol{\phi}_3 = \phi_2$, $\boldsymbol{\phi}_4 = \phi_3$, $\boldsymbol{\phi}_5 = \beta_3+\alpha_4-\gamma$ 그리고 $\boldsymbol{\phi}_6 = \beta_3+\beta_4-\gamma$ 이다. 식 (1)과 같이, Fig. 4 -1(c)의 Θ_3과 Θ_g 사이의 관계를 사상행렬과 위상각을 사용하여 식 (57)와 같이 나타난다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta_3 + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_2 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_9 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_3 + \beta_2 - \gamma \\ \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \beta_3 + \alpha_4 - \gamma \\ \beta_3 + \beta_4 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{57}$$

M과 **K**는 각각 $\mathbf{M} = diag[s_{2+8+3+(\alpha3+\beta2-\gamma)}, s_{8+3+\phi1}, s_{3+\phi2}, s_{3+4+\phi3}, s_{3+4+5+(\beta3+\alpha4-\gamma)}, s_{3+4+9+(\beta3+\beta4-\gamma)}] \in R^{6\times6}$와 $\mathbf{K} = [k_1b_1h_1, k_2b_2h_2, k_3b_3h_3, k_4b_4h_4, k_5b_5h_5, k_6b_6h_6]^T \in R^{6\times1}$이다. 식 (55), **M**, **K** 그리고 식 (57)의 **J**를 설계 방정식 (4)에 대입하여, Fig. 4 -1(c)의 중력보상기에 대한 설계 방정식 Fig. 4 -4을 유도한다. Fig. 4 -4에 의해서, 스프링 상수는 다음과 같이 결정된다:

$$k_1 = gm_1l_{1g} / (b_1h_1) \tag{58}$$
$$k_2 = C_1 / (b_2h_2) \tag{59}$$
$$k_3 = C_2 / (b_3h_3) \tag{60}$$
$$k_4 = C_3 / (b_4h_4) \tag{61}$$
$$k_5 = gm_5l_{5g} / (b_5h_5) \tag{62}$$
$$k_6 = gm_6l_{6g} / (b_6h_6) \tag{63}$$

$$\begin{bmatrix} s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} gm_1l_{1g} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5l_{5g} \\ gm_6l_{6g} \end{Bmatrix}$$
$$- \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{3+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \\ k_5b_5h_5 \\ k_6b_6h_6 \end{Bmatrix} = 0$$

Fig. 4 -4. The design equation of Θ_3

Collection @ chosun

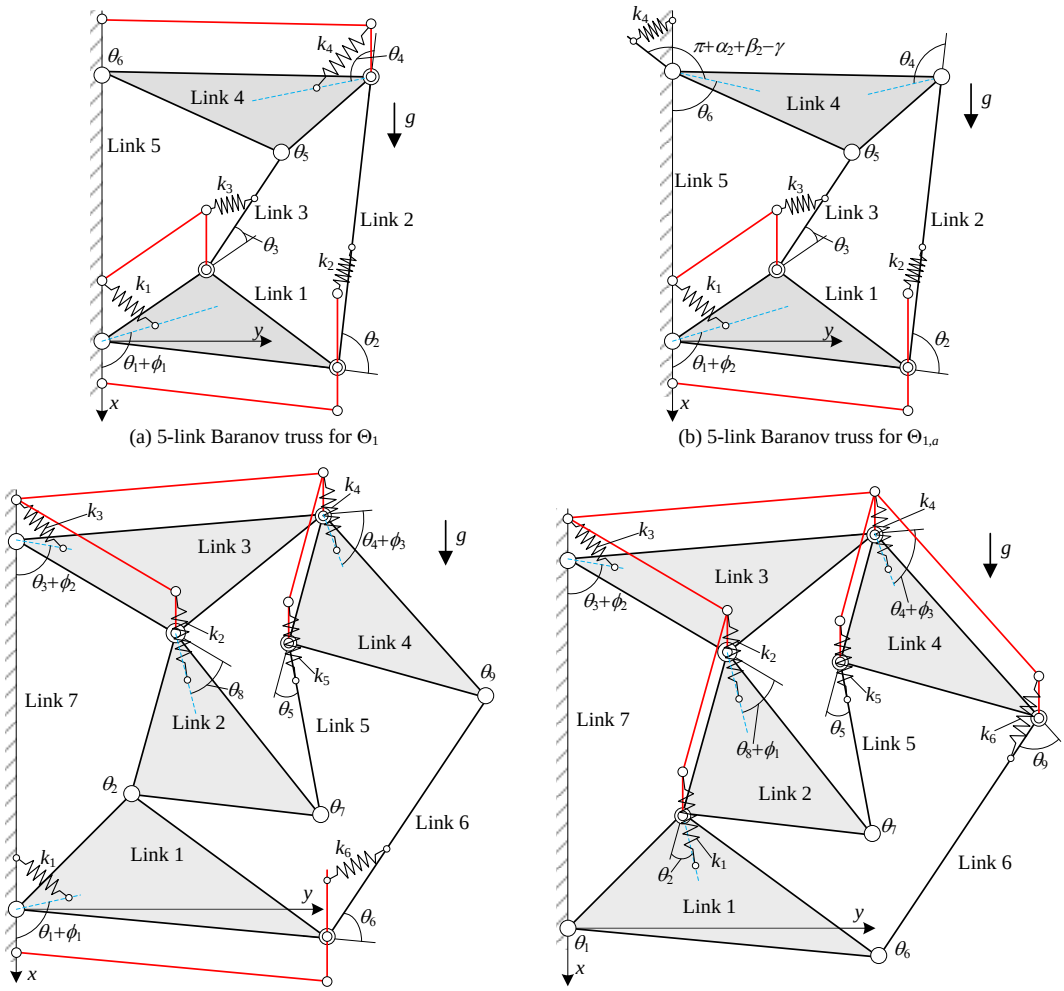
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 절 Baranov truss의 중력보상기

관절공간 Θ_1, $\Theta_{1,a}$, Θ_2 그리고 Θ_3의 중력보상기들은 Fig. 4 -5(a)-(d)에 각각 그렸다. 사상행렬은 단위 중력보상기들의 위치 또는 관절공간과 단위 중력보상기의 회전각도 사이의 기구학적 제약을 나타낸다. 식 (14)의 사상행렬 **J**을 고려하면, θ_{g1}은 θ_1에, θ_{g2}은 $\theta_1 + \theta_2$에, θ_{g3}은 $\theta_1 + \theta_3$에, θ_{g4}은 $\theta_1 + \theta_2 + \theta_4$에 각각 부착된다. $\theta_{g2} = \theta_1 + \theta_2$, $\theta_{g3} = \theta_1 + \theta_3$ 그리고 $\theta_{g4} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_4$들은 병렬 제약(parallel constraint)이 필요하며, 평행사변형 기구로 Fig. 4 -5(a)와 같이 구현한다. Fig. 4 -5(a)에서 ϕ_1은 식 (14)에서 위상각이다. 대체 관절공간 $\Theta_{1,a}$의 사상에 대한 2개의 병렬 제약이 필요하므로, Fig. 4 -5(b)에 2개의 평행사변형 기구가 장착된다. Θ_2와 Θ_3의 사상에 대한 4개의 병렬 제약이 필요하므로, Fig. 4 -5(c)와 Fig. 4 -5(d)에는 각각 4개의 평행사변형 기구가 장착된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 5-link Baranov truss for Θ_1

(b) 5-link Baranov truss for $\Theta_{1,a}$

(c) 7-link Baranov truss for Θ_2

(d) 7-link Baranov truss for Θ_3

Fig. 4 -5. Gravity compensators of Baranov trusses

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 설계 예

본 장에서는 제안된 삭제규칙을 제 4장에 제시된 Baranov truss의 중력보상기에 적용한다. 삭제규칙 적용에 의해서, 다양한 기구의 중력보상기를 기구학 및 에너지 계산 없이 얻는 과정을 설명한다. 본 논문에선 4절 링크기구, Stephenson 기구 그리고 Watt 기구들이 대응 링크기구로 사용하며, 대응 링크기구들에서 파생되는 슬라이딩 기구의 개수는 총 16개이다.

Baranov truss의 중력보상기에서 설계 예제에 대한 중력보상기가 유도되는 과정을 Fig. 5-1, Fig. 5-2 그리고 Fig. 5-3에 요약 정리하였다. 설계 예제의 중력보상기 유도과정에 관한 설명은 해당 절에서 자세히 기술하였다. 5장 1절에서는 5-link Baranov truss의 중력보상기로부터 4절 링크기구의 중력보상기를 유도하고, 유도된 4절 링크기구의 중력보상기로부터 슬라이딩 기구의 중력보상기를 유도한다. 또한, 5장 2절(또는 3절)에서는 7-link Baranov truss의 중력보상기로부터 Stephenson(또는 Watt) 기구의 중력보상기 유도하고, 유도된 Stephenson(또는 Watt) 기구의 중력보상기로부터 다양한 슬라이딩 기구의 중력보상기를 유도한다. 5장 4절에선 7-link Baranov truss의 중력보상기에서 4절 링크기구에 대한 중력보상기를 유도하며, 5장 1절에서 4절 링크기구의 중력보상기와 비교한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

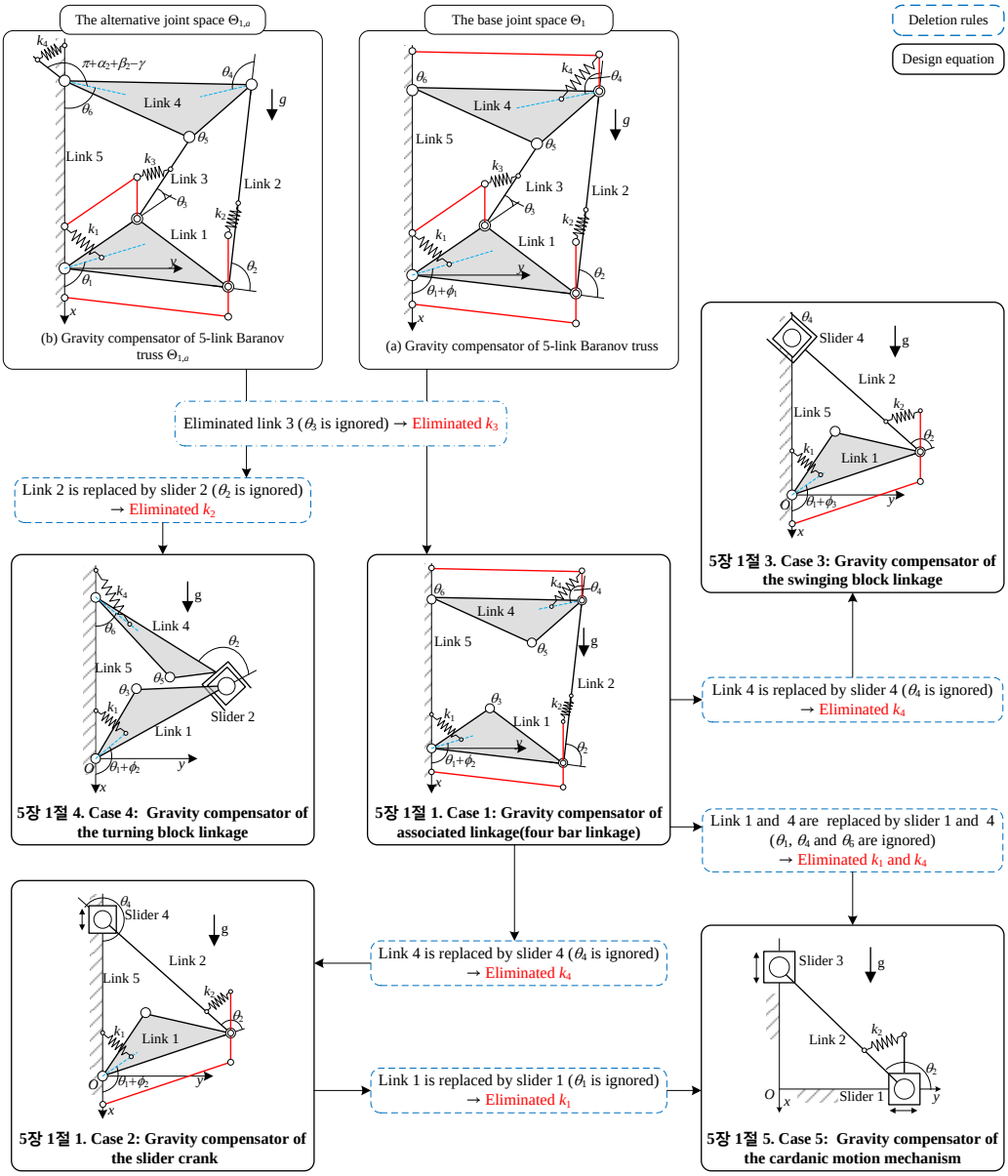


Fig. 5 -1. Design overview I: gravity compensators of derived mechanisms from the five-link Baranov truss

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

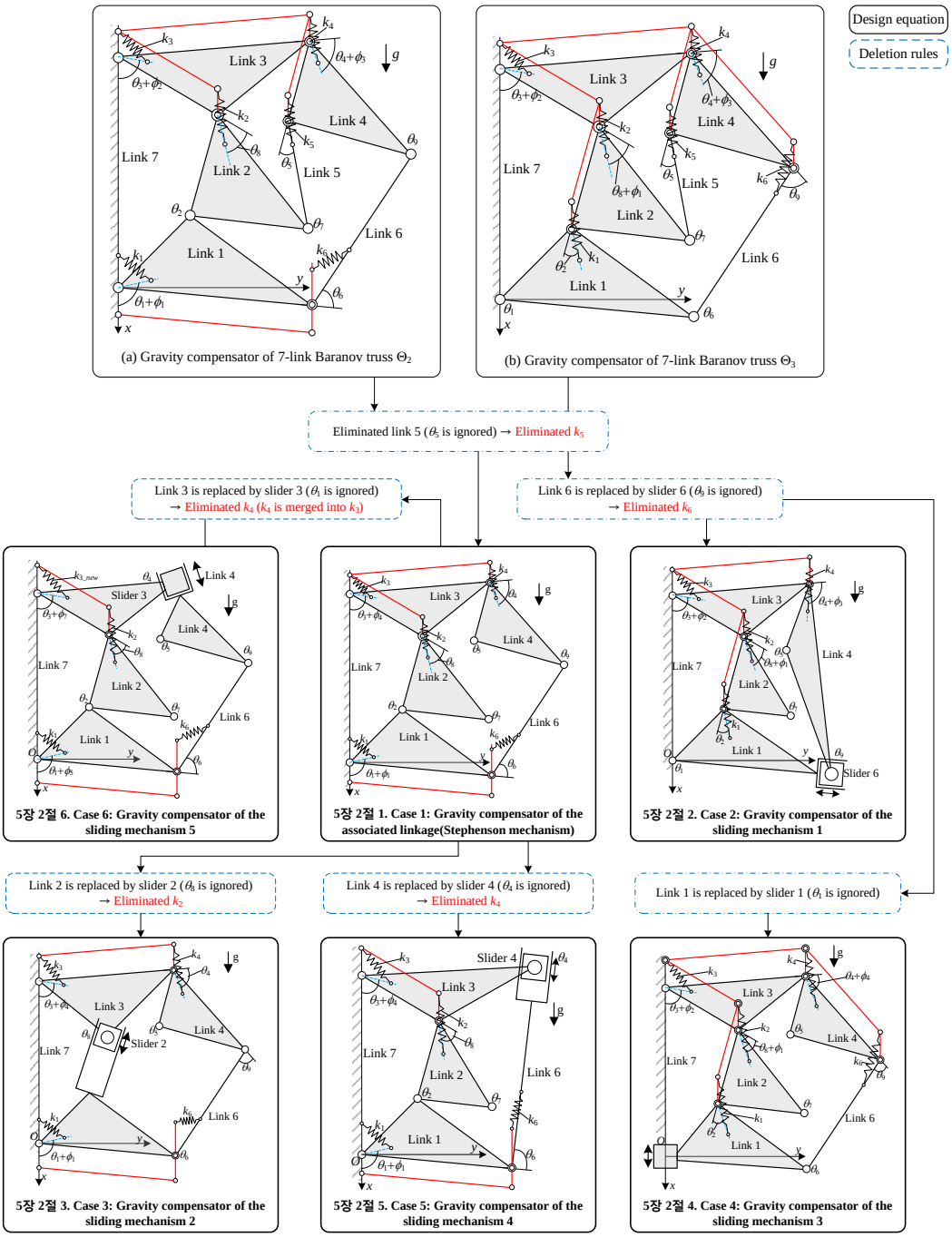


Fig. 5 -2. Design overview II: gravity compensators of derived mechanisms from the seven-link Baranov truss

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

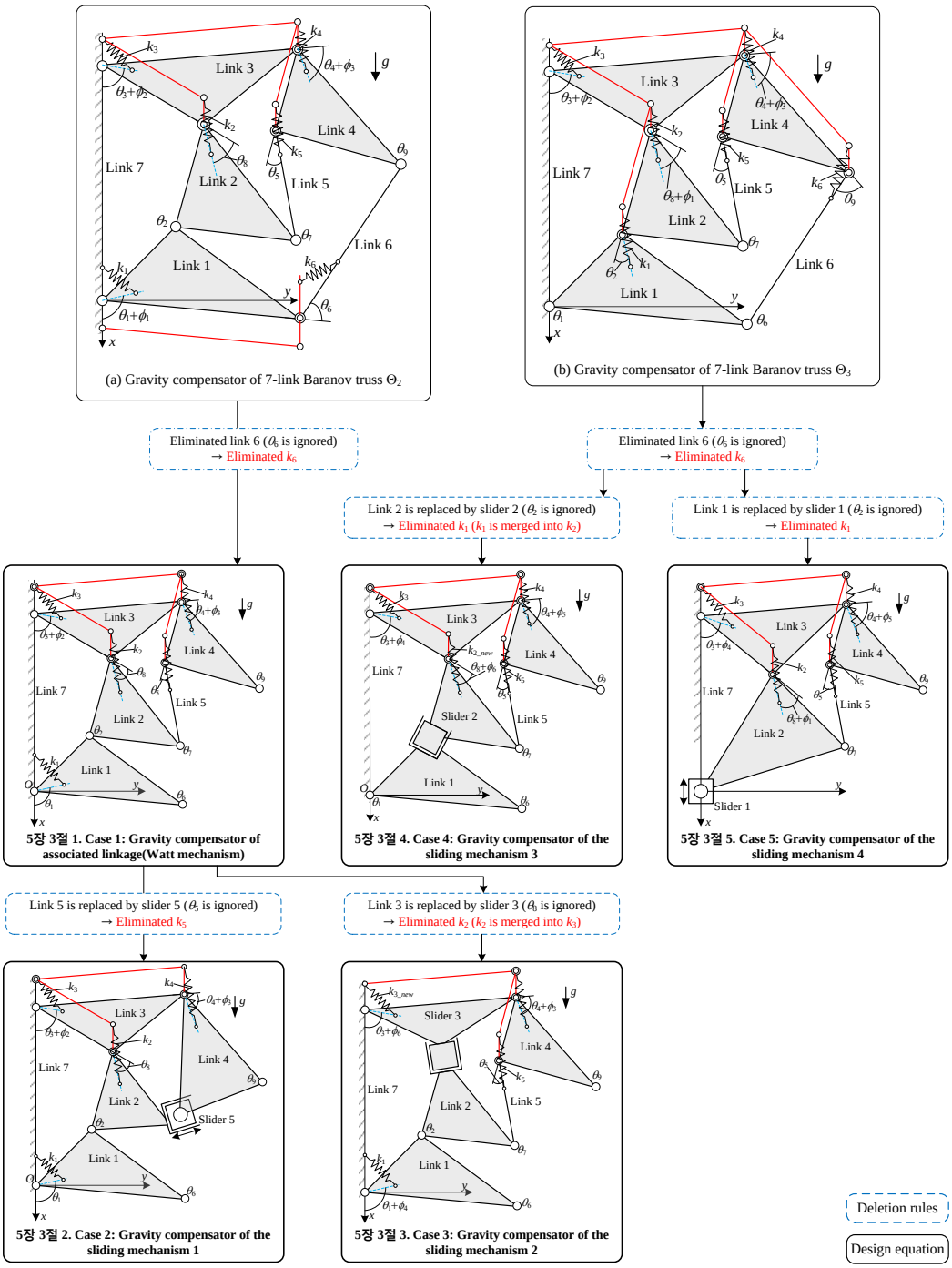


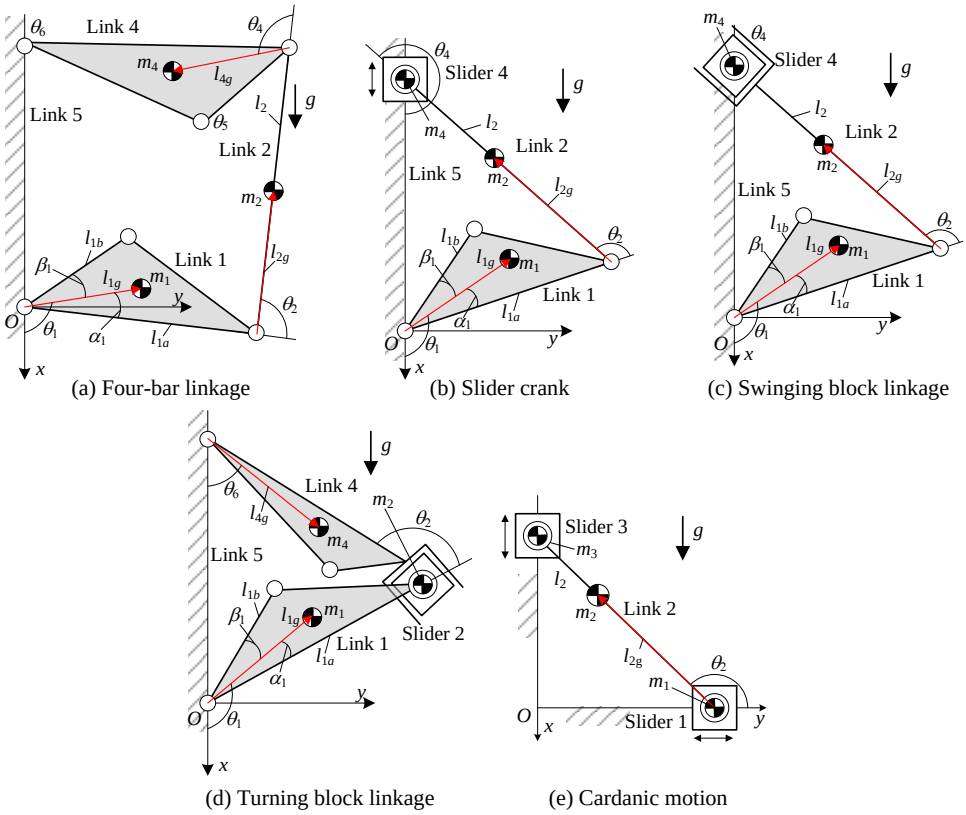
Fig. 5 -3. Design overview III: gravity compensators of derived mechanisms from the seven-link Baranov truss

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 5-link Baranov truss에서 파생된 기구들

이번 절에서는 식 (15) 또는 식 (25)에 삭제규칙을 적용하여, 4절 링크기구와 다양한 슬라이딩 기구에 대한 중력보상기를 유도한다. Fig. 5 -4은 4절 링크기구와 다양한 슬라이딩 기구들을 나타낸다. .Fig. 5 -4에서 중력은 $\mathbf{g} = g[c_\gamma, s_\gamma]^T$ 이다.



(a) Four-bar linkage (b) Slider crank (c) Swinging block linkage

(d) Turning block linkage (e) Cardanic motion

Fig. 5 -4. Four bar linkage and sliding mechanisms [35].

1. Case 1: Associated linkage

Fig. 5 -4 (a) 4절 링크기구는 Fig. 4 -1(a)에서 링크 3을 제거함으로써 유도된다. 변

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

형규칙의 의해서, Fig. 4 -1(a)의 링크 3이 제거되었기 때문에 l_3과 l_{3g}은 영(zero)이 되며 링크 3에 관한 θ_3과 θ_3는 무시된다. 관절공간 집합 Θ_1에서, Fig. 5 -4(a)에 대한 관절공간을 유도한다:

$$\Theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_4]^T \tag{64}$$

삭제규칙 1-7이 식 (15)에 적용되며, Fig. 5 -5은 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서, 식 (15)에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 3rd 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 3rd 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 3rd 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_3와 $\mathbf{J}^T$의 3rd 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,3}$과 $\mathbf{f}(\Theta)$의 3rd 열 벡터들은 각각 삭제규칙 과정 6과 7에 의해 제거된다. 링크 3이 제거되어 m_3이 무시되므로, $V_{m_\max,1}$은 $C_2 = sqrt(A_2^2 + B_2^2)$, $A_2 = gm_1l_{1g}c_\gamma + g(m_2 + m_4)l_ac_{\alpha 1-\gamma}$ 그리고 $B_2 = -gm_1l_{1g}s_\gamma + g(m_2 + m_4)l_as_{\alpha 1-\gamma}$ 가 된다. Fig. 5 -4(a)에 대한 사상관계는 식 (65)과 같이 결정된다.

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_2 \\ \alpha_1 - \gamma \\ \alpha_1 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{65}$$

여기서, $\phi_2 = \tan^{-1}(B_2/A_2)$이다. 스프링 상수 k_2와 k_4는 각각 식 (17)와 식 (19)에 동일하다. k_1은 $C_2 / (b_1h_1)$이다.

$$\begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ g(m_2l_{2g} + m_4l_2) \\ gm_3l_{3g} \\ gm_4l_{4g} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \end{Bmatrix} = 0$$

Fig. 5 -5. The design equation for Fig. 5 -4(a)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. Case 2: Slider crank

Fig. 5 -4(b) slider crank는 Fig. 5 -4(a)에서 회전관절 θ_6이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -4(a)에서 링크 4은 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로 l_4와 l_{4g}은 영(zero)이 된다. 슬라이더 4의 질량 m_4은 링크 2에 병합된다. Fig. 5 -4(a)에서 Fig. 5 -4(b)에 대한 관절공간을 유도한다:

$$\Theta = [\theta_1, \theta_2]^T \tag{66}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 5 -5에 적용되며, Fig. 5 -6은 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서, Fig. 5 -5에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 4th 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 4th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 4th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_4와 $\mathbf{J}^T$의 4th 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,4}$과 $\mathbf{f}(\Theta)$의 4th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. Fig. 5 -4(b)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다.

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_2 \\ \alpha_1 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{67}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -6을 기반으로, 스프링 상수 k_1와 k_2는 계산된다. 여기서, k_1와 k_2는 각각 제 5 장제 1 절1에서 k_1과 k_2에 동일하다.

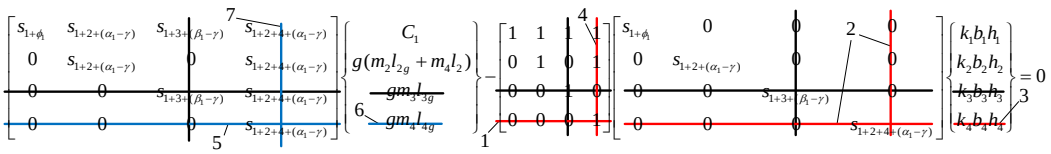


Fig. 5 -6. The design equation for Fig. 5 -4(b)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. Case 3: Swinging block linkage

Fig. 5 -4(c) Swinging block linkage는 Fig. 5 -4(a)에서 회전관절 θ_4이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -4(a)에서 링크 4가 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로, l_4와 l_{4g}은 영(zero)이 된다. 슬라이더 4의 질량 m_4은 링크 5 (즉, 고정링크)에 병합되므로, m_4는 무시한다. 즉, Fig. 5 -4(c)의 관절공간은 식 (66)과 동일하다. 삭제규칙 1-7이 Fig. 5 -5에 적용하면, 새로운 설계방정식의 유도과정은 Fig. 5 -6와 같다. 하지만 m_4가 무시되므로, $V_{m_max,1} = C_3$과 $V_{m_max,2} = gm_2l_{2g}$이 된다. 여기서, $C_3 = sqrt(A_3^2 + B_3^2)$, $\phi_3 = \tan^{-1}(B_3/A_3)$, $A_3 = gm_1l_{1g}c_\gamma + gm_2l_{1a}c_{\alpha1-\gamma}$ 그리고 $B_3 = -gm_1l_{1g}s_\gamma + gm_2l_{1a}s_{\alpha1-\gamma}$ 이다. Fig. 5 -4(c)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_3 \\ \alpha_1 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{68}$$

스프링 상수는 $k_1 = C_3 / (b_1h_1)$와 $k_2 = gm_2l_{2g} / (b_2h_2)$ 이다.

4. Case 4: Turning block linkage

Fig. 5 -4(d) Turing block linkage는 Fig. 5 -4(a)에서 회전관절 θ_4이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -4(a)에서 링크 2은 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로 l_2와 l_{2g}은 영(zero)이 된다. 슬라이더 2의 질량 m_2은 링크 1에 병합된다. Fig. 5 -4(d)의 모든 링크들의 동작을 결정하기 위해서는 θ_1와 θ_6가 필요하다. 즉, 대체 관절공간 $\Theta_{1,a}$가 Fig. 5 -4(d)에 사용되며, θ_2와 θ_3는 제거된다. 즉, Fig. 5 -4(d)에 대한 관절공간은 식 (69)으로 결정된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Theta = [\theta_1, \theta_6]^T \tag{69}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 5 -5에 적용되며, Fig. 5 -7는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서 (즉, θ_2와 θ_3 제거), Fig. 5 -5에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 2nd와 3rd 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 2nd와 3rd 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 2nd와 3rd 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_2, K_3 그리고 $\mathbf{J}^T$의 2nd와 3rd 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_max,2}$, $V_{m_max,3}$ 그리고 $\mathbf{f}(\Theta)$의 2nd와 3rd 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. 링크 3이 제거되었으므로, $V_{m_max,1} = C_2$가 된다. 여기서, $C_2 = sqrt(A_2^2 + B_2^2)$, $\phi_2 = \tan^{-1}(B_2/A_2)$, $A_2 = gm_1 l_{1g} c_\gamma + gm_2 l_a c_{\alpha 1\text{-}\gamma}$ 그리고 $B_2 = -gm_1 l_{1g} s_\gamma + gm_2 l_a s_{\alpha 1\text{-}\gamma}$이다. Fig. 5 -4(d)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_2 \\ \pi + \alpha_2 + \beta_2 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{70}$$

여기서, 링크 4는 binary link이므로, $\alpha_2 = \beta_2 = 0$이다. 스프링 상수 $k_1 = C_2 / (b_1 h_1)$이며, k_4는 5장2절의 식 (29)과 동일하다.

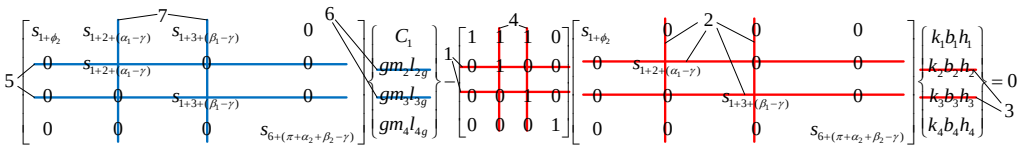


Fig. 5 -7. The design equation for Fig. 5 -4(d)

5. Case 5: Cardanic motion

Fig. 5 -4(e) Cardanic motion은 Fig. 5 -4(b)에서 회전관절 θ_1이 미끄럼 관절로 대체

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

됨으로써 유도된다. 변형규칙을 적용하면, Fig. 5 -4(b)에서 링크 1이 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로, l_1과 l_{1g}은 영(zero)이 된다. 슬라이더 1의 질량 m_1은 링크 2에 병합된다. Fig. 5 -4(e)의 관절공간은 $\Theta = [\theta_2]$ 이다. 삭제규칙 1-7이 Fig. 5 -6에 적용되며, Fig. 5 -8는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서, Fig. 5 -6에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 1st 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 1st 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 1st 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_1와 $\mathbf{J}^T$의 1st 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,1}$과 $\mathbf{f}(\Theta)$의 1st 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. Fig. 5 -4(e)에서 $\theta_1 = \pi/2$이며, 슬라이더 1의 운동방향을 나타낸다. 그러므로, 그림 6(e)에 대한 사상관계는 $\Theta_g = \theta_2 + (\pi/2 - \gamma)$ 이다. 스프링 상수 k_2는 5장1절의 식 (17)과 동일하다

$$
\begin{bmatrix}
s_{1+\phi_1} & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\
0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\
0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)} \\
0 & 0 & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
C_1 \\
g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) \\
\cancel{g m_3 l_{3g}} \\
\cancel{g m_4 l_{4g}}
\end{Bmatrix}
-
\begin{bmatrix}
1 & 1 & 1 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 \\
0 & s_{1+2+(\alpha_1-\gamma)} & 0 & 0 \\
0 & 0 & s_{1+3+(\beta_1-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & s_{1+2+4+(\alpha_1-\gamma)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
\cancel{k_1 b_1 h_1} \\
k_2 b_2 h_2 \\
\cancel{k_3 b_3 h_3} \\
\cancel{k_4 b_4 h_4}
\end{Bmatrix} = 0
$$

Fig. 5 -8. The design equation for Fig. 5 -4(e)

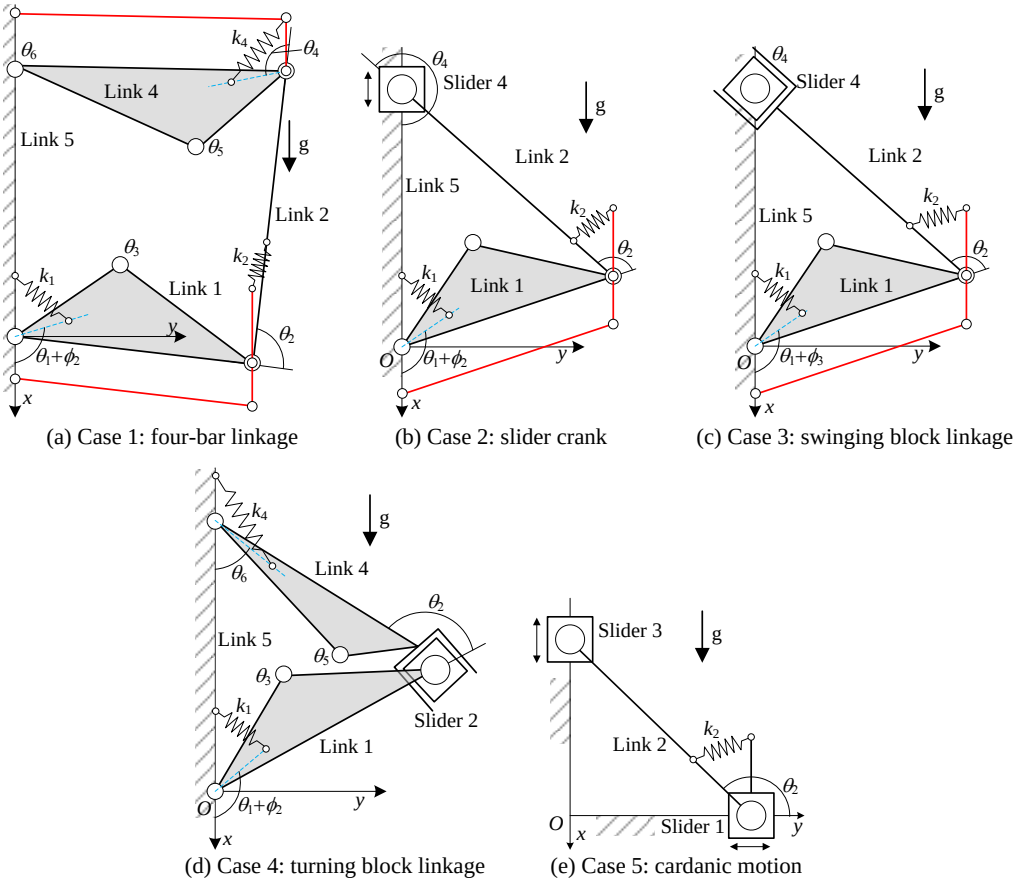
6. 5-link Baranov truss에서 파생된 기구의 중력보상기

Fig. 5 -9은 Fig. 5 -4(a)-(e)의 중력보상기들을 나타낸다. Case 1 경우, Fig. 4 -1(a)에서 링크 3이 제거되었기 때문에 (즉, θ_3 무시), Fig. 4 -1(a)에서 θ_{g3} (= $\theta_1 + \theta_3$)의 단위 중력보상기가 무시된다. Case 2와 Case 3인 경우, Fig. 5 -4(a)에서 링크 4의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에 (즉, θ_4 무시), Fig. 5 -9(a)에서 θ_{g4} (= $\theta_1 + \theta_2 + \theta_4$)의 단위 중력보상기가 무시된다. Case 4 경우, Fig. 5 -4(a)에서 링크 2의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에 (즉, θ_2 무시). Fig. 4 -1(b)에서 θ_{g3} (= $\theta_1 + \theta_3$)과 θ_{g2} (= $\theta_1 + \theta_2$)의

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

단위 중력보상기가 무시된다. Case 5 경우, Fig. 5 -9(b)에서 링크 1의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에, Fig. 5 -9(b)에서 θ_{g1} (= θ_1)의 단위 중력보상기가 제거된다.



(a) Case 1: four-bar linkage (b) Case 2: slider crank (c) Case 3: swinging block linkage

(d) Case 4: turning block linkage (e) Case 5: cardanic motion

Fig. 5 -9. Gravity compensators for Fig. 5 -4(a)-(e)

7. 미끄럼 관절의 고려

Fig. 5 -4(e) 경우, 기구의 자세 계산시 미끄럼 관절의 변위를 고려해야 한다.따라서, 포텐셜 에너지는 미끄럼 관절의 변위에 따라 변화한다. 본 연구에서 제안한 변형규칙 및 삭제규칙에선 회전관절이 미끄럼 관절로 변경되는 경우만 고려되었고,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

링크들의 자세를 결정하기 위해서 적어도 고정링크에 연결된 회전관절이 필요하였다. 따라서, 미끄럼 관절의 변위가 포텐셜 에너지 계산시 필요한 경우, 포텐셜 에너지는 불가피하게 재계산되며, 설계 방정식의 재정리까지 이어진다.

예를 들어 Fig. 5 -4(e) cardanic motion 기구를 고려하자. 중력은 $\mathbf{g} = g[c_\gamma, s_\gamma]^T$으로 주어진다고 가정한다. Fig. 4 -1(a)를 고려할 때, cardanic motion 기구의 자세는 식 (6)-(9)의 위치벡터에서 $\theta_1 = \pi/2$, $l_{1a} = l_{1b} = -l_2 s_{1+2}$, 그리고 $l_{1g} = -\varphi l_2 s_{1+2}$으로 대체함으로써 결정할 수 있다. 여기서, $\varphi = l_{1g}/l_1$이다. 식 (10)에서 삼각함수 합성 $-C_1 c_{1+\phi 1}$을 분해하여, 식 (71)으로 전개한다.

$$\begin{aligned} V_m &= -\sum_{i=1}^{n=4} m_i \mathbf{g} \cdot \mathbf{P}_i \\ &= -m_1 g l_{1g} c_{1-\gamma} - g(m_2 + m_4) l_{1a} c_{1+\alpha_1-\gamma} - m_3 g l_{1b} c_{1+\beta_1-\gamma} \\ &\quad - g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) c_{1+2+\alpha_1-\gamma} - m_3 g l_{3g} c_{1+3+\beta_1-\gamma} - m_4 g l_{4g} c_{1+2+4+\alpha_1-\gamma} \end{aligned} \tag{71}$$

식 (71)에 $\theta_1 = \pi/2$, $l_{1a} = l_{1b} = -l_2 s_{1+2}$, $\alpha_1 = \beta_1 = 0$ 그리고 $l_{1g} = -\varphi l_2 s_{1+2}$을 대입하여, cardanic motion 기구에 대한 질량의 포텐셜 에너지 식 (72)을 유도된다.

$$\begin{aligned} V_m &= g(m_1\varphi + m_2 + m_3 + m_4) l_2 s_{1+2} c_{\pi/2-\gamma} \\ &\quad - g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) c_{2+\pi/2-\gamma} - m_3 g l_{3g} c_{3+\pi/2-\gamma} - m_4 g l_{4g} c_{2+4+\pi/2-\gamma} \end{aligned} \tag{72}$$

변형규칙 (즉, $m_3 = l_{3g} = l_{4g} = 0$ 그리고 θ_3은 관절공간에서 무시된다. 이때, 링크 1과 링크 4는 binary link이므로, m_1과 m_4는 인접한 링크 2에 병합되며, $\varphi = 1$이다) 을 식 (72)에 적용한다.

$$V_m = t_1 s_{2+\pi/2} c_{\pi/2-\gamma} - t_2 c_{2+\pi/2-\gamma} \tag{73}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서, $t_1 = g(m_1 + m_2 + m_4)l_2$ 그리고 $t_2 = g(m_2 l2_g + m_4 l_2)$이다. θ_2와 γ에 관한 항으로 정리하기 위해서, 식 (73)의 삼각함수를 분해 및 정리한다.

$$\begin{aligned} t_1 s_{2+\pi/2} c_{\pi/2-\gamma} - t_2 c_{2+\pi/2-\gamma} &= t_1 c_2 c_{\pi/2-\gamma} - t_2 (c_{2+\pi/2} c_\gamma + s_{2+\pi/2} s_\gamma) \\ &= t_1 c_2 c_{\pi/2-\gamma} - t_2 (c_{2+\pi/2} c_\gamma + c_2 s_\gamma) \\ &= (t_1 - t_2) c_2 s_\gamma - t_2 c_{2+\pi/2} c_\gamma \end{aligned} \tag{74}$$

식 (74)에 t_1과 t_2를 대입하여, cardanic motion 기구에 대한 포텐셜 에너지 식 (75)을 유도한다.

$$V_m = -V_{m_prismatic} c_2 - V_{m_revolute} c_{2+\pi/2} \tag{75}$$

여기서, $V_{m_prismatic} = -g((m_1 + m_2)l_2 - m_2 l_{2g}) s_\gamma$ 그리고 $V_{m_revolute} = g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2) c_\gamma$이다. 식 (75)에 대한 설계 방정식은 식 (76)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} s_2 & s_{2+\pi/2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{m_prismatic} \\ V_{m_revolute} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_2 & 0 \\ 0 & s_{2+\pi/2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1 b_1 h_1 \\ k_2 b_2 h_2 \end{Bmatrix} = 0 \tag{76}$$

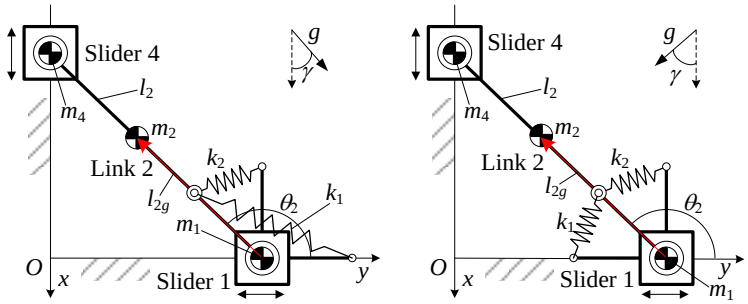
$V_{m_prismatic}$와 $V_{m_revolute}$의 부호는 γ에 따라서 다르다. 사상관계의 위상각은 s_g와 c_g에 의해서 양의 $V_{m_prismatic}$와 $V_{m_revolute}$을 유지하도록 조절되어야 한다. 예를 들면, $\gamma = \pi/2$이라고 가정할 때, $c_\gamma > 0$과 $s_\gamma > 0$ 이므로, $V_{m_prismatic} < 0$ 과 $V_{m_revolute} > 0$ 이다. 이 상황에서, 식 (75)의 c_2는 $-c_{2\pm\pi}$으로 변경하여 $V_{m_prismatic}$는 양의 값을 가진다. $-c_{2\pm\pi}$는 c_2으로 동일하기 때문에, 식 (75)과 (76)에서 변화는 발생하지 않으며, 오직 위상각 π가 작용된다. 식 (76)으로부터, 스프링 상수 식 (77)과 식 (78)이 계산되며, 식 (76)에 관한 중력보상기는 Fig. 5 -10에 제시하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$k_1 = g\left(\left(m_1 + m_2\right)l_2 - m_2 l_{2g}\right)\left|s_\gamma\right| / (b_1 h_1) \tag{77}$$

$$k_2 = g(m_2 l_{2g} + m_4 l_2)\left|c_\gamma\right| / (b_2 h_2) \tag{78}$$



(a) $\gamma > 0$ (b) $\gamma < 0$

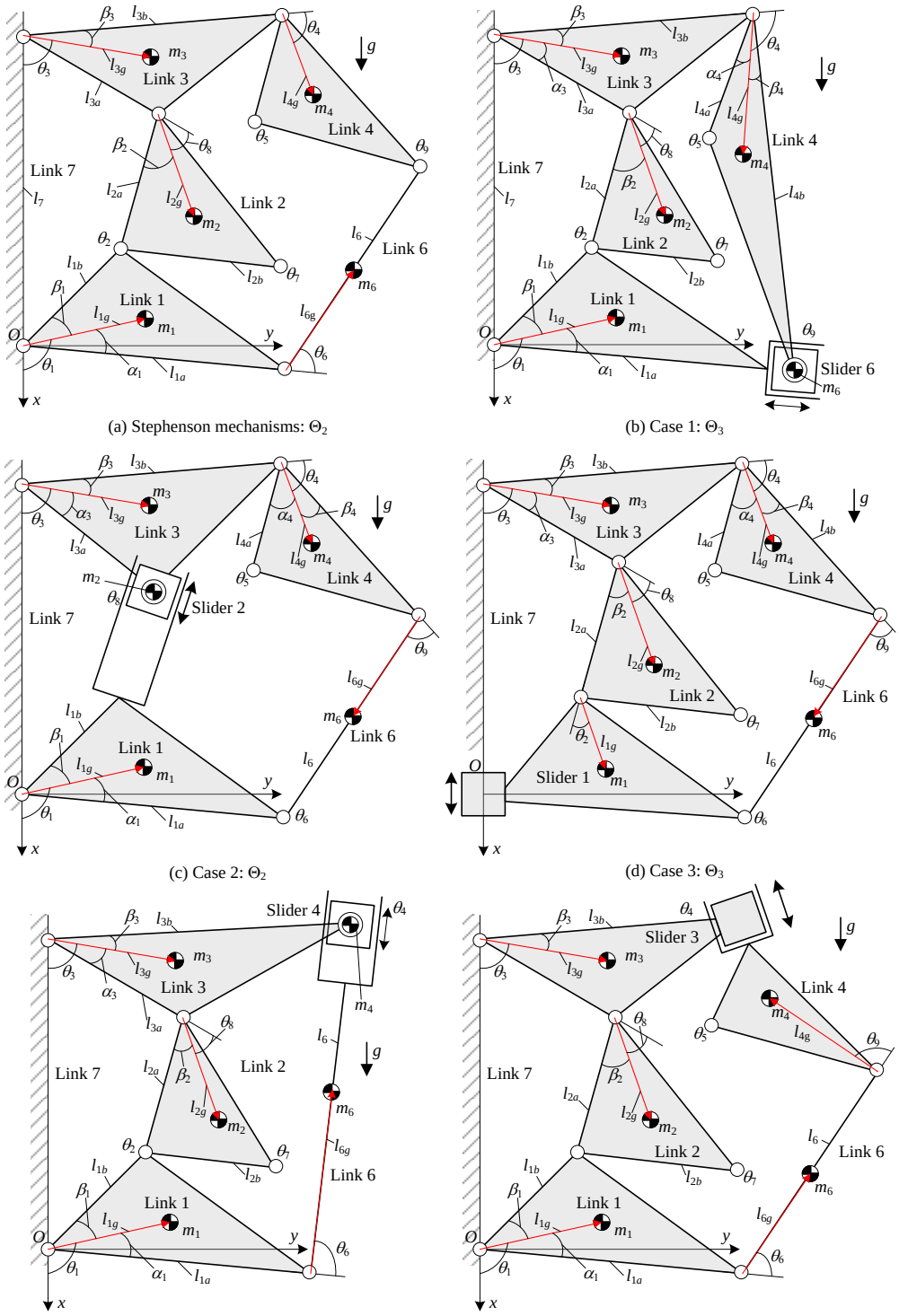
Fig. 5 -10. Gravity compensators of the cardanic motion with the offset angle γ in the gravity

제 2 절 7-link Baranov truss에서 파생된 기구들 I

이번 절에서는 Fig. 4 -3 또는 Fig. 4 -4에 삭제규칙을 적용하여, Stephenson 기구와 다양한 슬라이딩 기구에 대한 중력보상기를 유도한다. Fig. 5 -11은 Stephenson 기구와 다양한 슬라이딩 기구들을 나타낸다. Fig. 5 -11에서 중력은 $\mathbf{g} = g[c_\gamma, s_\gamma]^T$ 이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Stephenson mechanisms: Θ_2

(b) Case 1: Θ_3

(c) Case 2: Θ_2

(d) Case 3: Θ_3

(e) Case 4: Θ_2

(f) Case 5: Θ_2

Fig. 5 -11. Stephenson mechanism and sliding mechanisms [34].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. Case 1: Associated linkage

Fig. 5 -11(a) Stephenson 기구는 Fig. 4 -1(b) (또는 Fig. 4 -1(c))에서 링크 5을 제거함으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 4 -1(b) (또는 Fig. 4 -1(c))에서 링크 5가 제거되었기 때문에, l_5과 l_{5g}은 영(zero)이 되며 링크 5에 관한 회전관절 θ_5과 θ_7는 무시된다. 관절공간 Θ_2을 선택하여 Fig. 5 -11(a)의 관절공간 식 (79)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_1, \theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_6]^T \tag{79}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 4 -3에 적용되며, Fig. 5 -12는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서, Fig. 4 -3에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 5th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 5th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_5와 $\mathbf{J}^T$의 5th 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,5}$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7에 의해서 제거된다. 링크 5가 제거되어 m_5이 무시되므로, $V_{m_\max,3} = C_4$와 V $V_{m_\max,4} = gm_4l_{4g}$이 된다. 여기서, $C_4 = sqrt(A_4^2 + B_4^2)$, $\phi_4 = \tan^{-1}(B_4/A_4)$, $A_4 = gm_3l_{3g}c_\gamma + gm_2l_{3a}c_{\alpha3-\gamma} + gm_4l_{3b}c_{\beta3-\gamma}$ 그리고 $B_4 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + gm_2l_{3a}s_{\alpha3-\gamma} + gm_4l_{3b}s_{\beta3-\gamma}$ 이다. Fig. 5 -11(a)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \alpha_3 - \gamma \\ \phi_4 \\ -\gamma \\ \alpha_1 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{80}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -12을 기반으로, 스프링 상수 k_1, k_2 그리고 k_6는 각각 5장 3절의 식 (41), 식 (42) 그리고 식 (46)과 동일하며, $k_3 = C_4 / (b_3h_3)$와 $k_4 = m_4gl_{4g} / (b_4h_4)$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이다.

$$
\begin{bmatrix}
s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \\
0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix} C_1 \\ gm_2l_{2g} \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5l_{5g} \\ gm_6l_{6g} \end{Bmatrix}
$$

$$
-\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & s_{3+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \\ k_5b_5h_5 \\ k_6b_6h_6 \end{Bmatrix} = 0
$$

Fig. 5 -12. The design equation of Fig. 5 -11(a)

2. Case 2: Sliding mechanism 1

Fig. 5 -11(b)는 Fig. 5 -11(a)에서 회전관절 θ_6이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -11(a)에서 링크 6이 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로, l_6와 l_{6g}은 영(zero)이 된다. 슬라이더 6의 질량 m_6은 링크 4에 병합된다. 관절공간 Θ_3을 선택하여, Fig. 5 -11(b)의 관절공간 식 (81)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_2, \theta_8, \theta_3, \theta_4]^T \tag{81}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 4 -4에 적용되며, Fig. 5 -13는 삭제과정을 나타낸다. 여기서, 회전관절이 미끄럼 관절로 대체와 링크 5 제거가 동시에 고려되어야 한다. 관절공간의 감소에 의해서(즉, θ_5와 θ_9 제거), Fig. 4 -4에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th와 6th 행 벡터들이 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 5th와 6th 행 벡터들이 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 5th와 6th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_5와 K_6 그리고 $\mathbf{J}^T$의 5th와 6th 열 벡터들은

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

삭제된다. $V_{m_max,5}$, $V_{m_max,6}$ 그리고 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th와 6th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7에 의해서 제거된다. 링크 5가 제거되어 m_5이 무시되므로, $V_{m_max,3} = C_4$와 $V_{m_max,4} = C_5$이 된다. 여기서, i = 4, 5일 때, $C_i = sqrt(A_i^2 + B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$이며, $A_4 = gm_3l_{3g}c_\gamma + g(m_1+m_2)l_{3a}c_{\alpha3-\gamma} + g(m_4+m_6)l_{3b}c_{\beta3-\gamma}$, $B_4 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + g(m_1+m_2)l_{3a}s_{\alpha3-\gamma} + g(m_4+m_6)l_{3b}s_{\beta3-\gamma}$, $A_5 = gm_4l_{4g}c_{\beta3-\gamma} + gm_6l_{4b}c_{\beta3+\beta4-\gamma}$ 그리고 $B_5 = gm_4l_{4g}s_{\beta3-\gamma} + gm_6l_{4b}s_{\beta3+\beta4-\gamma}$ 이다. Fig. 5 -11(b)대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_2 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_3 + \beta_2 - \gamma \\ \phi_1 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \end{Bmatrix} \tag{82}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -13을 기반으로, 스프링 상수 k_1와 k_2는 각각 식 (58)과 식 (59)에 동일하며, $k_3 = C_4/(b_3h_3)$와 $k_4 = C_5/(b_4h_4)$ 이다.

$$\begin{bmatrix} s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} gm_1l_{1g} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5l_{5g} \\ gm_6l_{6g} \end{Bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{3+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \\ k_5b_5h_5 \\ k_6b_6h_6 \end{Bmatrix} = 0$$

Fig. 5 -13. The design equation of Fig. 5 -11(b)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. Case 3: Sliding mechanism 2

Fig. 5 -11(c)는 Fig. 5 -11(a)에서 회전관절 θ_2가 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -11(a)에서 링크 2가 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로, l_2와 l_{2g}은 영(zero)이 된다. 관절공간 식 (79)에서 Fig. 5 -11(c)의 관절공간 식 (83)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_1, \theta_3, \theta_4, \theta_6]^T \tag{83}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 5 -12에 적용되며, Fig. 5 -14는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서 (즉, θ_8이 제거), Fig. 5 -12에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 2nd 행 벡터가 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 2nd 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 2nd 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_2와 $\mathbf{J}^T$의 2nd 열 벡터들은 삭제된다. $V_{m_\max,2}$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 2nd 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7에 의해서 제거된다. Fig. 5 -11(c)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_4 \\ -\gamma \\ \alpha_1 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{84}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -14을 기반으로, 스프링 상수 k_1, k_3, k_4 그리고 k_6은 각각 제 5 장제 2 절1의 k_1, k_3, k_4 그리고 k_6과 동일하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

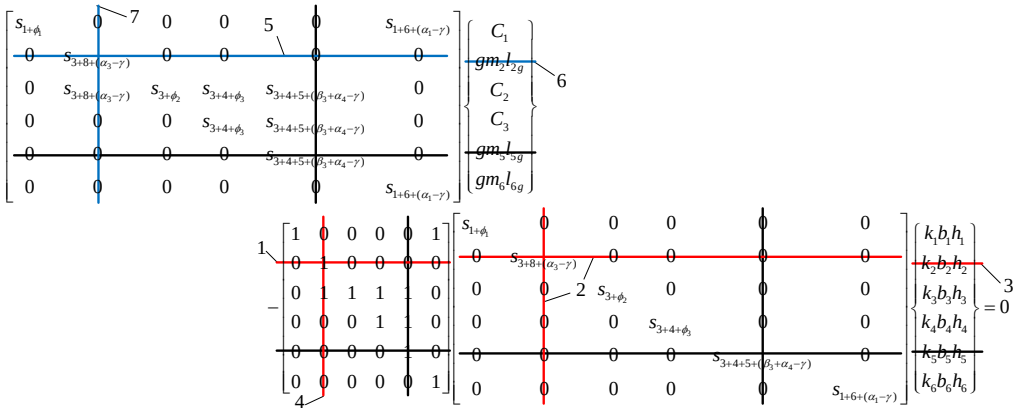


Fig. 5 -14. The design equation of Fig. 5 -11(c)

4. Case 4: Sliding mechanism 3

Fig. 5 -11(d)는 Fig. 5 -11(a)에서 회전관절 θ_1이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -11(a)에서 링크 1은 ternary link에서 슬라이더로 변경되었다. 관절공간 Θ_3으로부터 Fig. 5 -11(d)의 관절공간 식 (85)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_2, \theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_9]^T \tag{85}$$

삭제규칙 1-7은 Fig. 4 -4에 적용되며, Fig. 5 -15는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서 (즉, θ_5), Fig. 4 -4에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 5th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 5th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_5와 $\mathbf{J}^T$의 5th 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,5}$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7에 의해서 제거된다. Fig. 5 -11(d)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_2 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_9 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_3 + \beta_2 - \gamma \\ \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_4 \\ \beta_3 + \beta_4 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{86}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -15을 기반으로, 스프링 상수 k_1, k_2, k_3, k_4 그리고 k_6는 각각 식 (58)-(61) 그리고 식 (63)과 동일하다.

$$\begin{bmatrix} s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} gm_1l_{1g} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5l_{5g} \\ gm_6l_{6g} \end{Bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{2+8+3+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{3+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \\ k_5b_5h_5 \\ k_6b_6h_6 \end{Bmatrix} = 0$$

Fig. 5 -15. The design equation of Fig. 5 -11(d)

5. Case 5: Sliding mechanism 4

Fig. 5 -11(e)는 Fig. 5 -11(a)에서 회전관절 θ_9가 미끄럼 관절로 대체됨으로써 파생된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -11(a)에서 링크 4은 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로, l_4와 l_{4g}은 영(zero)이 되며, 링크 4에 관한 θ_4는 무시된다. 슬라이더 4의 질량 m_4은 링크 3에 병합된다. 관절공간 식 (79)으로부터 Fig. 5 -11(e)에 대한 관절공간 식 (87)을 유도한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Theta = [\theta_1, \theta_8, \theta_3, \theta_6]^T \tag{87}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 5 -12에 적용되며, Fig. 5 -16는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서 (즉, θ_4 제거), Fig. 5 -12에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 4th 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 4th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 4th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_4와 $\mathbf{J}^T$의 4th 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,4}$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 4th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7에 의해서 제거된다. Fig. 5 -11(e)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \alpha_3 - \gamma \\ \phi_4 \\ \alpha_1 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{88}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -16을 기반으로, 스프링 상수 k_1, k_2, k_3 그리고 k_6는 각각 제 5 장제 2 절1의 k_1, k_2, k_3 그리고 k_6과 동일하다.

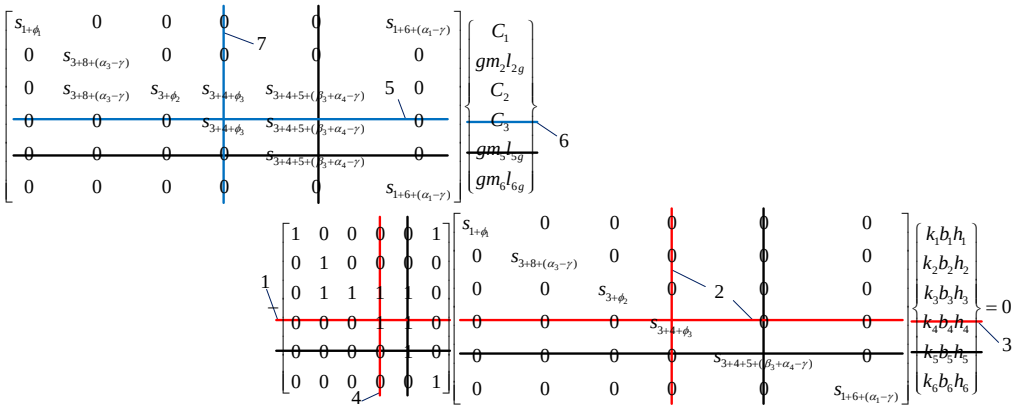


Fig. 5 -16. The design equation for Fig. 5 -11(e)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6. Case 6: Sliding mechanism 5

Fig. 5 -11(f)는 Fig. 5 -11(a)에서 회전관절 θ_4가 미끄럼 관절로 대체됨으로써 파생된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -11(a)에서 링크 3은 ternary link에서 슬라이더로 변경되었다. 관절공간 식 (79)으로부터, Fig. 5 -11(f)에 대한 관절공간 식 (89)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_1, \theta_8, \theta_3, \theta_6]^T \tag{89}$$

제 4 장제 3 절에서, 링크 4의 질량 m_4에 대한 위치벡터는 회전관절 θ_4를 기준으로 식 (33)으로 표현하였다 (즉, Fig. 5 -11(f)에서 식 (33)은 m_4에 대한 위치벡터가 될 수 없다). Fig. 4 -1(b)에 대한 기구적인 제약조건 식 (90)이 존재한다.

$$\theta_1 - \alpha_1 + \theta_6 + \theta_9 - \psi_2 + \theta_4 = \pi + \theta_3 + \beta_3 \tag{90}$$

관절공간 식 (89)으로 m_4에 대한 위치벡터를 표현하기 위해서, 식 (90)을 이용하여, 식 (33)을 식 (91)과 같이 다시 정리한다.

$${}^7\mathbf{P}_4 = l_{1a}[c_{1+\alpha_1}, s_{1+\alpha_1}]^T + l_6[c_{1+6+\alpha_1}, s_{1+6+\alpha_1}]^T + l_{4g}[c_{3+4+(\pi+\beta_3+\psi_2)}, s_{3+4+(\pi+\beta_3+\psi_2)}]^T \tag{91}$$

식 (91)을 설계 방정식 Fig. 5 -12에 고려하면, $f_{34} = f_{44} = M_{44} = s_{3+4+(\pi+\beta 3+\psi 2-\gamma)}$, $V_{m_max,1} = C_5$ 그리고 $V_{m_max,3} = C_6$으로 기술된다. 여기서, $i = 5, 6$일 때, $C_i = sqrt(A_i^2+B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$, $A_5 = gm_1l_{1g}c_\gamma + g(m_4+m_6)l_{1a}c_{\alpha 1-\gamma}$, $B_5 = -gm_1l_{1g}s_\gamma + g(m_4+m_6)l_{1a}s_{\alpha 1-\gamma}$, $A_6 = gm_3l_{3g}c_\gamma + gm_2l_{3a}c_{\alpha 3-\gamma}$ 그리고 $B_6 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + gm_2l_{3a}s_{\alpha 3-\gamma}$ 이다. 이때, 삭제규칙 1-8을 Fig. 5 -12에 적용하며, Fig. 5 -17는 삭제과정을 나타낸다. 삭제규칙 1에 근거하여, $\mathbf{J}^T$의 4th 행 벡터가 제거된다. 이때, $\mathbf{J}^T$의 3rd와 4th 열 벡터들이 서로 동일하게 된다. 그러므로, 인접한 요소는 f_{33}, $V_{m_max,3}$, M_{33} 그리고 K_3으로 결정된다. 게다가, $f_{33}V_{m_max,3} + f_{34}V_{m_max,4}$와 $M_{33}K_3$ +

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$M_{44}K_4$는 간단한 사인함수로 표현되며, 크기와 위상각은 각각 $C_7 = sqrt(A_7^2 + B_7^2)$와 $\phi_7 = \tan^{-1}(B_7/A_7)$이다. 여기서, $A_7 = gm_3 l_{3g} c_\gamma + gm_2 l_{3a} c_{\alpha 3-\gamma} + gm_4 l_{4g} c_{4+\pi+\beta 3+\psi 2-\gamma}$ 그리고 $B_7 = -gm_3 l_{3g} s_\gamma + gm_2 l_{3a} s_{\alpha 3-\gamma} + gm_4 l_{4g} s_{4+\pi+\beta 3+\psi 2-\gamma}$ 이다. f_{33}과 M_{33} 둘 다 $\sin(\theta_3+\phi_7)$으로 대체되며, $V_{m_\max,3_new}$는 C_7이다. 게다가, K_3은 C_7에 동일하다. 단위 중력보상기 4개가 필요하며, 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_5 \\ \alpha_3 - \gamma \\ \phi_7 \\ \alpha_1 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{92}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -17을 기반으로, 스프링 상수 k_2와 k_6는 각각 제 5 장제 2 절1의 k_2와 k_6에 동일하며, $k_1 = C_5/(b_1 h_1)$와 $k_{3_new} = C_7/(b_3 h_3)$이다.

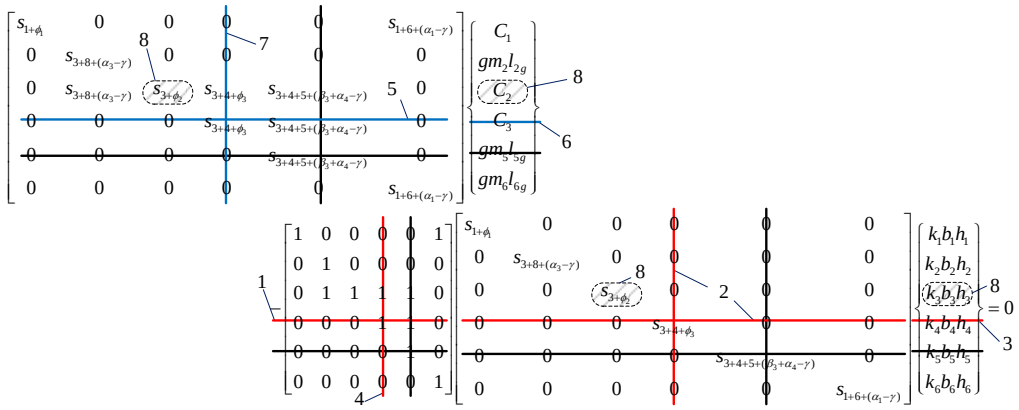


Fig. 5 -17. The design equation for Fig. 5 -11(f)

Collection @ chosun

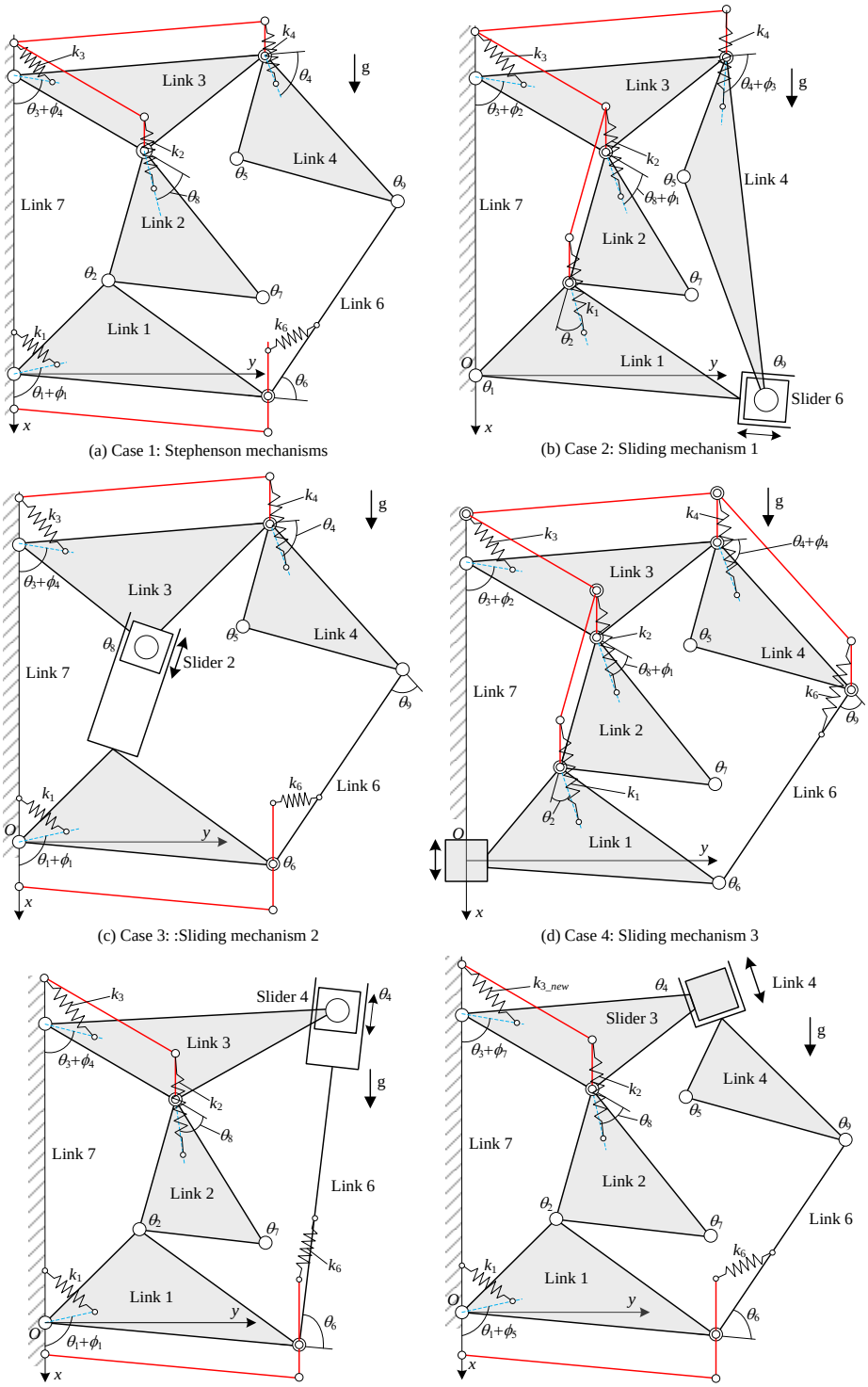
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

7. 7-link Baranov truss에서 파생된 기구의 중력보상기 I

Fig. 5-18은 Fig. 5-11(a)-(e)에 대한 중력보상기들을 나타낸다. Case 1 경우, Fig. 4-1(b) (또는 Fig. 4-1(d))에서 링크 5가 제거되었기 때문에 (즉, θ_5와 θ_7 무시), Fig. 4-5(c) (또는 Fig. 4-5(d))에서 θ_{g5} (= $\theta_3 + \theta_4 + \theta_5$)에 대한 단위 중력보상기가 무시된다. Case 2 경우, Fig. 5-11(a)에서 링크 6의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에 (즉, θ_6 무시), Fig. 4-5(d)에서 θ_{g5} (=$\theta_3 + \theta_4 + \theta_5$)와 θ_{g6} (= $\theta_1 + \theta_6$)의 단위 중력보상기들이 무시된다. Case 3 경우, Fig. 5-11(a)에서 링크 2의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에 (즉, θ_8 무시), θ_{g2} (= $\theta_3 + \theta_8$)의 단위 중력보상기가 무시된다. Case 4 경우, Fig. 5-11(a)에서 링크 1이 슬라이더로 변경되었기 때문에 (즉, θ_1 무시), Fig. 4-5(d)에서 θ_{g5}를 제외한 단위 중력보상기들이 사용된다. Case 5 경우, Fig. 5-11(a)에서 링크 4의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에, θ_{g4} (= θ_3+ θ_4)의 단위 중력보상기가 무시된다. Case 6 경우, Fig. 5-11(a)에서 링크 3이 슬라이더로 변경되었기 때문에, θ_{g4} (= θ_3+ θ_4)의 단위 중력보상기가 무시된다. 이때, k_3와 k_4가 병합하여, k_3의 새로운 스프링 상수 (즉, Fig. 5-18(f)에서 k_{3_new})와 새로운 위상각 ϕ_7이 계산된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Case 1: Stephenson mechanisms

(b) Case 2: Sliding mechanism 1

(c) Case 3: :Sliding mechanism 2

(d) Case 4: Sliding mechanism 3

(e) Case 5: Sliding mechanism 4

(f) Case 6: Sliding mechanism 5

Fig. 5 -18. Gravity compensators for Fig. 5 -11(a)-(f)

Collection @ chosun

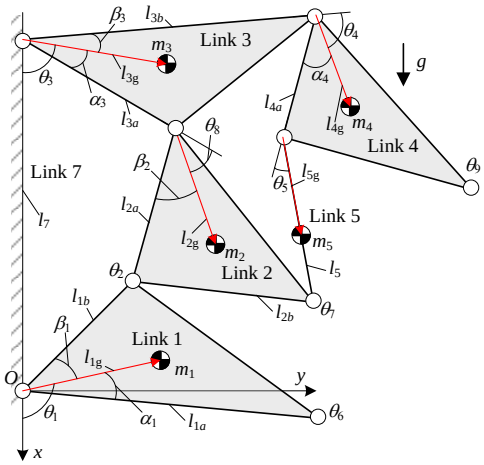
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 7-link Baranov truss에서 파생된 기구들 II

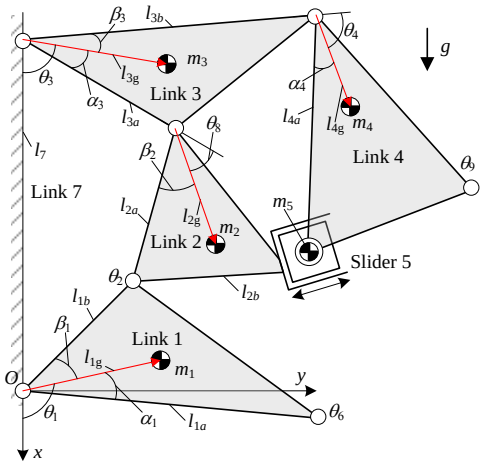
이번 절에서는 Fig. 4 -3 또는 Fig. 4 -4에 삭제규칙을 적용하여, Watt 기구와 다양한 슬라이딩 기구에 대한 중력보상기를 유도한다. Fig. 5 -19은 Watt 기구와 다양한 슬라이딩 기구들을 나타낸다. Fig. 5 -19에서 중력은 $\mathbf{g} = g[c_\gamma, s_\gamma]^T$ 이다.

Collection @ chosun

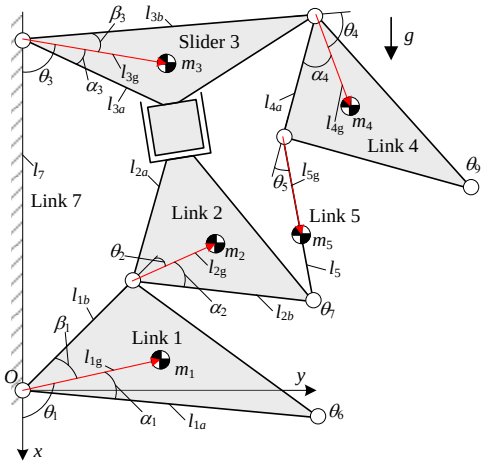
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



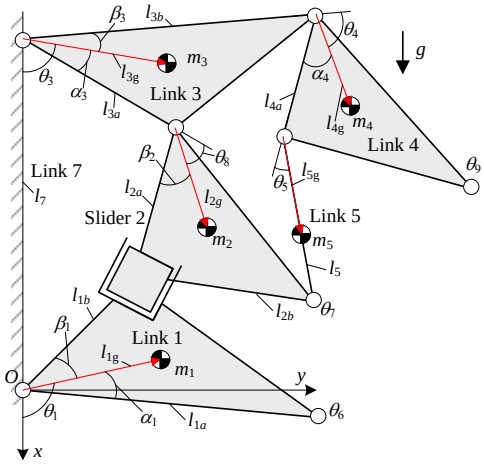
(a) Case 1: Watt mechanism: Θ_2



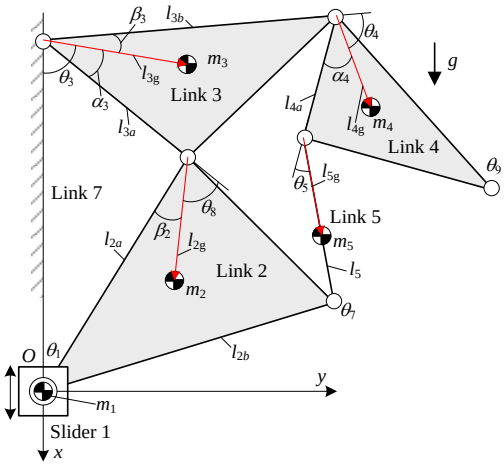
(b) Case 2: Θ_2



(c) Case 3: Θ_2



(d) Case 4: Θ_3



(e) Case 5: Θ_3

Fig. 5 -19. Watt mechanism and sliding mechanisms [34].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. Case 1: Associated linkage

Fig. 5 -19(a) Watt 기구는 Fig. 4 -1(b) (또는 Fig. 4 -1(c))에서 링크 6을 제거함으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 4 -1(b) (또는 Fig. 4 -1(c))에서 링크 6이 제거되었기 때문에, l_6과 l_{6g}은 영(zero)이 되며 링크 6에 관한 회전관절 θ_6과 θ_9는 무시된다. 관절공간 Θ_2을 선택하여 Fig. 5 -19(a)의 관절공간 식 (93)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_1, \theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T \tag{93}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 4 -3에 적용되며, Fig. 5 -20는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서, Fig. 4 -3에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 6th 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 6th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 6th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_5와 $\mathbf{J}^T$의 6th 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,6}$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 6th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. 링크 6이 제거되어 m_6이 무시되므로, $V_{m_\max,1} = gm_1l_{1g}$이 된다. Fig. 5 -19(a)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\gamma \\ \beta_3 - \gamma \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \beta_3 + \alpha_4 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{94}$$

여기서, 스프링 상수 k_2, k_3, k_4 그리고 k_5는 각각 5장3절의 식 (42)-(45)과 동일하며, $k_1 = m_1gl_{1g} / (b_1h_1)$이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$
\begin{bmatrix}
s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)} \\
0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
C_1 \\ gm_2l_{2g} \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5l_{5g} \\ gm_6l_{6g}
\end{Bmatrix}
-
\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
s_{1+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & s_{3+8+(\alpha_3-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & s_{3+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{1+6+(\alpha_1-\gamma)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \\ k_5b_5h_5 \\ k_6b_6h_6
\end{Bmatrix} = 0
$$

Fig. 5 -20. The design equation of Fig. 5 -19(a)

2. Case 2: Sliding mechanism 1

Fig. 5 -19(b)는 Fig. 5 -19(a)에서 회전관절 θ_7이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -19(a)에서 링크 5가 binary link에서 슬라이더로 변경되었으므로, l_5와 l_{5g}은 영이 된다. 슬라이더 5의 질량 m_5은 링크 4에 병합된다. 관절공간 식 (93)에서, Fig. 5 -19(b)의 관절공간 식 (95)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_1, \theta_8, \theta_3, \theta_4]^T \tag{95}$$

삭제규칙 1-7이 Fig. 5 -20에 적용되며, Fig. 5 -21는 삭제과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서 (즉, θ_5 제거), Fig. 5 -20에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th 행 벡터가 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 5th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 5th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_5와 $\mathbf{J}^T$의 5th 열 벡터들은 삭제된다. $V_{m_\max,5}$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 5th 열 벡터는 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. Fig. 5 -19(b) 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\gamma \\ \beta_3 - \gamma \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \tag{96}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -21을 기반으로, 스프링 상수 k_1, k_2, k_3 그리고 k_4는 각각 제 5 장제 3 절1의 스프링 상수 k_1, k_2, k_3 그리고 k_4와 같다.

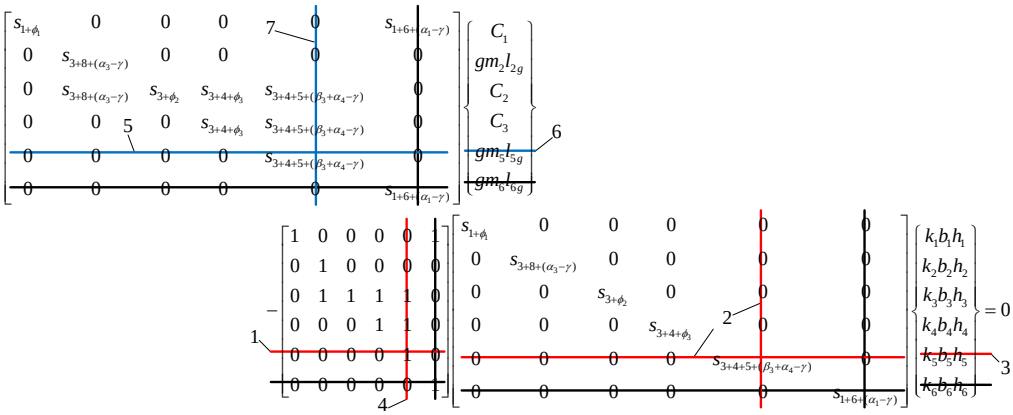


Fig. 5 -21. The design equation of Fig. 5 -19(b)

3. Case 3: Sliding mechanism 2

Fig. 5 -19(c)는 Fig. 5 -19(a)에서 회전관절 θ_8이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙을 적용하면, Fig. 5 -19(a)에서 링크 2가 ternary link에서 슬라이더로 변경되었으므로, 질량 m_2은 고려되어야 한다. 관절공간 식 (93)에서, Fig. 5 -19(b)의 관절공간 식 (95)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_1, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T \tag{97}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장제 3 절에서, 링크 2의 질량 m_2에 대한 위치벡터는 회전관절 θ_8을 기준으로 식 (31)으로 표현하였다. (즉, Fig. 5 -19(c)에서 식 (31)은 m_2에 대한 위치벡터가 될 수 없다). Fig. 4 -1(b)에서 기구적인 제약조건은 식 (98)이 존재한다.

$$\theta_1 + \beta_1 + \theta_2 + \psi_1 + \theta_8 = \theta_3 - \alpha_3 + \pi \tag{98}$$

관절공간 식 (97)로 m_2에 대한 위치벡터를 표현하기 위해서, 식 (98)을 식 (31)에 적용하여, 식 (99)과 같이 다시 정리한다.

$$^{7}\mathbf{P}_2 = l_{1b}[c_{1+\beta_1}, s_{1+\beta_1}]^T + l_{2g}[c_{\theta_3+\theta_8+(\pi-\alpha_3-\psi_1)}, s_{\theta_3+\theta_8+(\pi-\alpha_3-\psi_1)}]^T \tag{99}$$

식 (99)을 설계 방정식 Fig. 5 -20에 고려하면, $f_{22} = f_{32} = M_{22} = s_{3+8+(\pi-\alpha 3-\psi 1-\gamma)}$, $V_{m_\max,1} = C_4$ 그리고 $V_{m_\max,3} = C_5$으로 기술된다. 여기서, i =4, 5일 때, $C_i = sqrt(A_i^2 + B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$, $A_4 = gm_1l_{1g}c_\gamma + gm_2l_{1b}c_{\beta 1-\gamma}$, $B_4 = -gm_1l_{1g}s_\gamma + gm_2l_{1b}s_{\beta 1-\gamma}$, $A_5 = gm_3l_{3g}c_\gamma + g(m_4+m_5)l_{3b}c_{\beta 3-\gamma}$ 그리고 $B_5 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + g(m_4+m_5)l_{3b}s_{\beta 3-\gamma}$ 이다. 이때, 삭제규칙 1-8이 Fig. 5 -20에 적용되며, Fig. 5 -22는 삭제과정을 나타낸다. 삭제규칙 1에 근거하여, $\mathbf{J}^T$의 2th 행 벡터가 제거된다. 이때, $\mathbf{J}^T$의 2nd와 3rd 열 벡터들이 서로 동일하게 된다. 그러므로, 인접한 요소는 f_{33}, $V_{m_\max,3}$, M_{33} 그리고 K_3으로 결정된다. 게다가, $f_{33}V_{m_\max,3} + f_{32}V_{m_\max,2}$와 $M_{22}K_2 + M_{33}K_3$는 간단한 사인함수로 표현되며, 크기와 위상각은 각각 $C_6 = sqrt(A_6^2 + B_6^2)$와 $\phi_6 = \tan^{-1}(B_6/A_6)$이다. 여기서, $A_6 = gm_3l_{3g}c_\gamma + g(m_4+m_5)l_{3b}c_{\beta 3-\gamma} + gm_2l_{2g}c_{8+\pi-\alpha 3-\psi 1-\gamma}$ 그리고 $B_6 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + g(m_4+m_5)l_{3b}s_{\beta 3-\gamma} + gm_2l_{2g}c_{8+\pi-\alpha 3-\psi 1-\gamma}$ 이다. f_{33}과 M_{33} 둘 다 $\sin(\theta_3+\phi_6)$으로 대체되며, $V_{m_\max,3_new} = C_6$이다. 게다가, K_3은 C_6에 동일하다. Fig. 5 -19(c)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다:

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_4 \\ \phi_6 \\ \phi_3 \\ \beta_3 + \alpha_4 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{100}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -21을 기반으로, 스프링 상수 k_4와 k_5는 각각 제 5 장제 3 절1의 k_4와 k_5에 동일하며, $k_1 = C_4/(b_1h_1)$와 $k_{3_new} = C_6/(b_3h_3)$을 가진다.

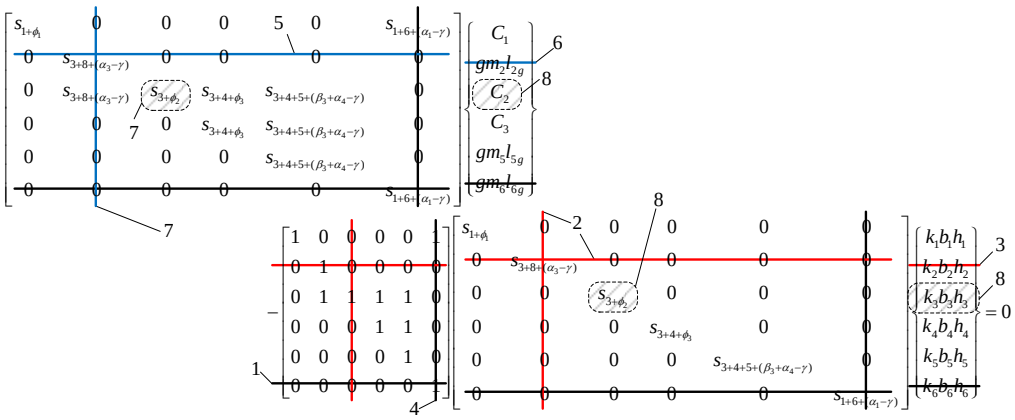


Fig. 5 -22. The design equation of Fig. 5 -19(c)

4. Case 4: Sliding mechanism 3

Fig. 5 -19(d)는 Fig. 5 -19(a)에서 회전관절 θ_2가 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -19(a)에서 링크 1은 ternary link에서 슬라이더로 변경되었다. 관절공간 Θ_3으로부터, Fig. 5 -19(d)에 대한 관절공간 식 (101)을 유도한다.

$$\Theta = [\theta_8, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T \tag{101}$$

제 4 장제 3 절에서, 링크 1의 질량 m_1에 대한 위치벡터는 회전관절 θ_2를 기준으로

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (47)로 표현하였다 (즉, Fig. 5 -19(d)에서 식 (47)은 m_1에 대한 위치벡터가 될 수 없다). 관절공간 식 (101)로 m_1에 대한 위치벡터를 표현하기 위해서, 식 (98)을 식 (47)에 적용하며, 식 (102)과 같이 다시 정리한다:

$$^{7}\mathbf{P}_1 = l_{1g}[c_{\theta_3+\theta_8+\theta_2+(\pi-\alpha_3-\beta_1-\psi_1)}, s_{\theta_3+\theta_8+\theta_2+(\pi-\alpha_3-\beta_1-\psi_1)}]^T \tag{102}$$

식 (99)을 설계 방정식 Fig. 5 -20에 고려할 때, 삭제규칙 1-8이 Fig. 4 -4에 적용한다. Fig. 5 -23는 삭제과정을 나타낸다. 제거된 링크 6에 관한 관절공간 축소에 의해서 (즉, θ_9 제거), Fig. 4 -4에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 6th 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 6th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 6th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_6와 $\mathbf{J}^T$의 6th 열 벡터는 삭제된다. $V_{m_\max,6}$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 6th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. 이때, $f_{11} = f_{21} = f_{31} = M_{11} = s_{3+8+2+(\pi-\alpha3-\beta1-\psi1)}$, $V_{m_\max,2} = gm_2l_{2g}$, $V_{m_\max,3} = C_4$ 그리고 $V_{m_\max,4} = C_5$으로 기술된다. 여기서, i = 4, 5일 때, $C_i = sqrt(A_i^2 + B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$, $A_4 = gm_3l_{3g}c_\gamma + gm_2l_{3a}c_{\alpha3-\gamma} + g(m_4+m_5)l_{3b}c_{\beta3-\gamma}$, $B_4 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + gm_2l_{3a}s_{\alpha3-\gamma} + g(m_4+m_5)l_{3b}s_{\beta3-\gamma}$, $A_5 = gm_4l_{4g}c_{\beta3-\gamma} + gm_5l_{4a}c_{\beta3+\alpha4-\gamma}$ 그리고 $B_5 = gm_4l_{4g}s_{\beta3-\gamma} + gm_5l_{4a}s_{\beta3+\alpha4-\gamma}$ 이다. 회전관절 θ_2가 미끄럼 관절로 대체됨으로써 (즉, 회전관절 θ_2의 무시), $\mathbf{J}^T$의 1st 행벡터가 제거된다. 이때, $\mathbf{J}^T$의 1st와 2nd 열 벡터들이 서로 동일하게 된다. 그러므로, 인접한 요소는 f_{22}, f_{32}, $V_{m_\max,2}$, M_{22} 그리고 K_2으로 결정된다. 게다가, $f_{21}V_{m_\max,1} + f_{22}V_{m_\max,2}$ (또는 $f_{31}V_{m_\max,1} + f_{32}V_{m_\max,2}$)와 $M_{11}K_1 + M_{22}K_2$ 는 간단한 사인함수로 표현되며, 크기와 위상각은 각각 $C_6 = sqrt(A_6^2 + B_6^2)$와 $\phi_6 = \tan^{-1}(B_6/A_6)$이다. 여기서, $A_6 = gm_2l_{2g}c_\gamma + gm_1l_{1g}c_{2+\pi-\alpha3-\beta1-\psi1-\gamma}$ 그리고 $B_6 = gm_2l_{2g}s_\gamma + gm_1l_{1g}s_{2+\pi-\alpha3-\beta1-\psi1-\gamma}$ 이다. f_{22}, f_{32} 그리고 M_{22} 둘 다 $\sin(\theta_3 + \theta_8 + \phi_6)$으로 대체되었으며, $V_{m_\max,2_new}$는 C_6이다. 게다가, K_2은 C_6에 동일하다. Fig. 5 -19(d)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_6 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \beta_3 + \alpha_4 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{103}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -23을 기반으로, 스프링 상수 k_5는 식 (62)와 동일하며, $k_{2_new} = C_6/(b_2h_2)$, $k_3 = C_4/(b_3h_3)$ 그리고 $k_4 = C_5/(b_4h_4)$이다.

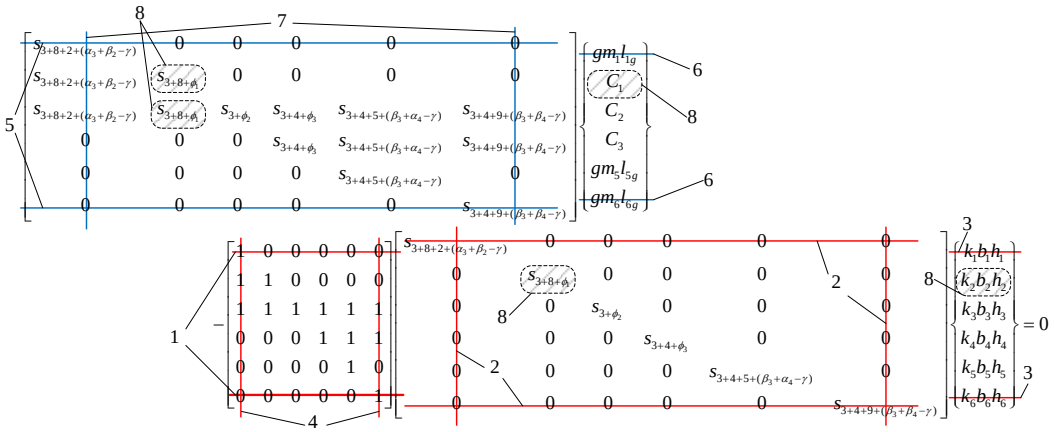


Fig. 5 -23. The design equation of Fig. 5 -19(d)

5. Case 5: Sliding mechanism 4

Fig. 5 -19(e)는 Fig. 5 -19(a)에서 회전관절 θ_1이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 유도된다. 변형규칙에 의해서, Fig. 5 -19(a)에서 링크 1은 binary link에서 슬라이더로 변경되었다. 관절공간 집합 Θ_3으로부터, Fig. 5 -19(e)에 대한 관절공간은 식 (101)과 같다.

삭제규칙 1-7이 Fig. 4 -4에 적용되며, Fig. 5 -24는 삭제과정을 나타낸다. 링크 6의 제거 및 회전관절 θ_1이 미끄럼 관절로 대체됨으로써 (즉, θ_9와 θ_2 제거), Fig. 4 -4

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 1st와 6th 행 벡터들을 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 1st와 6th 행 벡터들이 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 1st 그리고 6th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_1, K_6 그리고 $\mathbf{J}^T$의 1st와 6th 열 벡터들은 삭제된다. $V_{m_\max,1}$, $V_{m_\max,6}$ 그리고 $\mathbf{f}(\Theta)$의 1st와 6th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. 이때, $V_{m_\max,3}$과 $V_{m_\max,4}$는 각각 C_4와 C_5가 된다. 여기서, i = 4, 5일 때, $C_i = sqrt(A_i^2 + B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$, $A_4 = gm_3l_{3g}c_\gamma + g(m_{1+}m_2)l_{3a}c_{\alpha3-\gamma} + g(m_4+m_5)l_{3b}c_{\beta3-\gamma}$, $B_4 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + g(m_{1+}m_2)l_{3a}s_{\alpha3-\gamma} + g(m_4+m_5)l_{3b}s_{\beta3-\gamma}$, $A_5 = gm_4l_{4g}c_{\beta3-\gamma} + gm_5l_{4a}c_{\beta3+\alpha4-\gamma}$ 그리고 $B_5 = gm_4l_{4g}s_{\beta3-\gamma} + gm_5l_{4a}s_{\beta3+\alpha4-\gamma}$이다. Fig. 5 -19(e)에 대한 사상관계는 다음과 같이 결정된다.

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_8 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \beta_3 + \alpha_4 - \gamma \end{Bmatrix} \tag{104}$$

새로운 설계 방정식 Fig. 5 -24을 기반으로, 스프링 상수 k_2과 k_5는 각각 식 (59)과 식 (62)에 동일하며, $k_3 = C_4/(b_3h_3)$ 그리고 $k_4 = C_5/(b_4h_4)$이다.

$$\begin{bmatrix} s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & s_{3+8+\phi_1} & s_{3+\phi_2} & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} gm_1l_{1g} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ gm_5l_{5g} \\ gm_6l_{6g} \end{Bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{3+8+2+(\alpha_3+\beta_2-\gamma)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{3+8+\phi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{3+\phi_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{3+4+\phi_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+5+(\beta_3+\alpha_4-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{3+4+9+(\beta_3+\beta_4-\gamma)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1b_1h_1 \\ k_2b_2h_2 \\ k_3b_3h_3 \\ k_4b_4h_4 \\ k_5b_5h_5 \\ k_6b_6h_6 \end{Bmatrix} = 0$$

Fig. 5 -24. The design equation of Fig. 5 -19(e)

Collection @ chosun

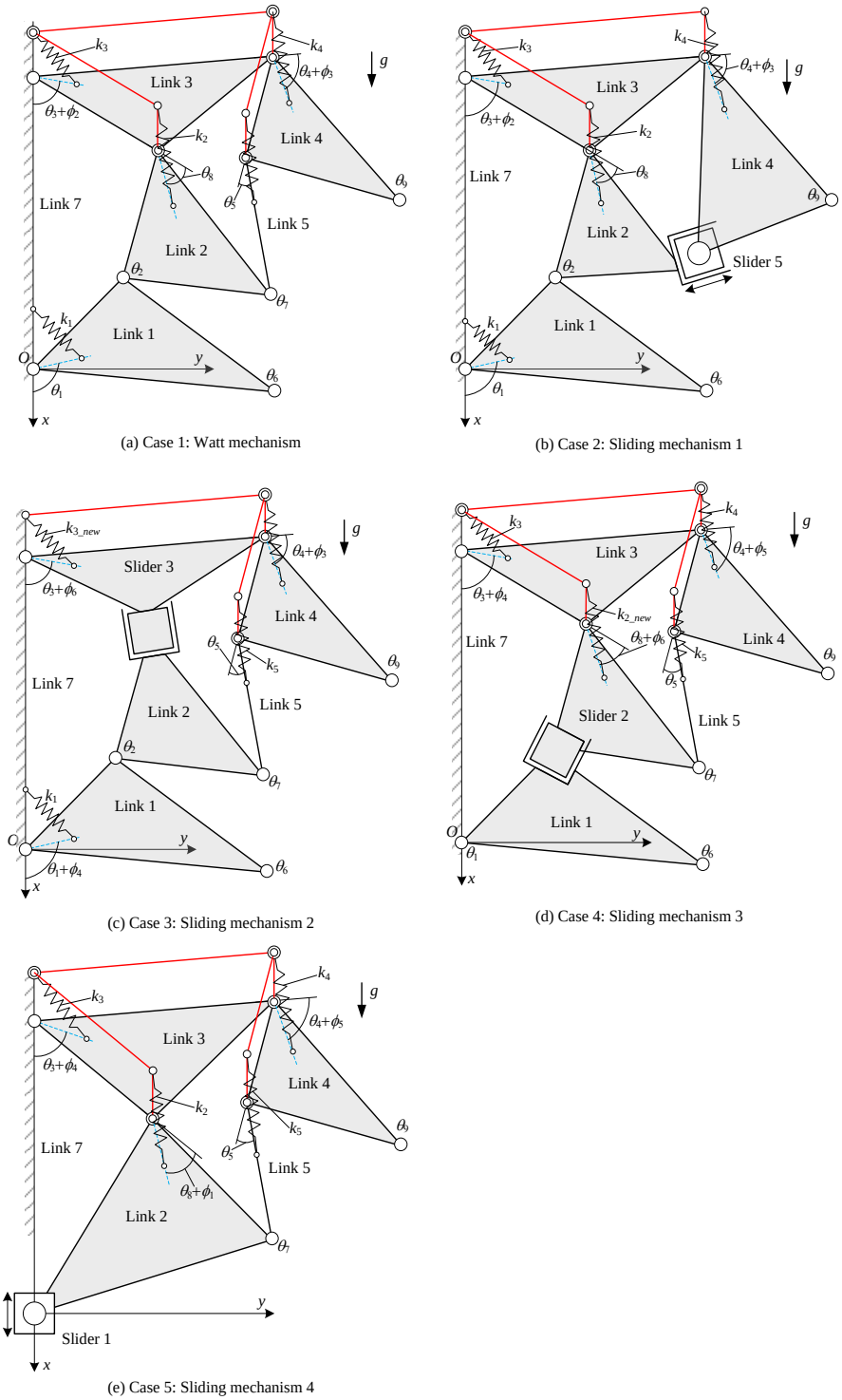
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6. 7-link Baranov truss에서 파생된 기구의 중력보상기 II

Fig. 5 -25는 Fig. 5 -19(a)-(e)에 대한 중력보상기들을 나타낸다. Case 1 경우, Fig. 4 -1(c) (또는 Fig. 4 -1(d))에서 링크 6이 제거되었기 때문에 (즉, θ_6와 θ_9 무시), Fig. 4 -5(c) (또는 Fig. 4 -5(d))에서 θ_{g6} (= $\theta_1 + \theta_6$ 또는 $\theta_3 + \theta_4 + \theta_9$)에 대한 단위 중력보상기가 무시된다. Case 2 경우, Fig. 5 -19(a)에서 링크 5의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에, Fig. 5 -25(a)에서 θ_{g5} (=$\theta_3 + \theta_4 + \theta_5$)애 대한 단위 중력보상기가 무시된다. Case 3 경우, Fig. 5 -19(a)에서 링크 3이 슬라이더로 변경되었기 때문에, Fig. 5 -25(a)에서 θ_{g2} (= $\theta_3 + \theta_8$)의 단위 중력보상기는 무시된다. 이때, Fig. 5 -25(a)의 k_2와 k_3가 병합하여, θ_{g3} (= θ_3)의 단위 중력보상기를 위한 k_3의 새로운 스프링 상수 (즉, Fig. 5 -25(c)에서 k_{3_new})와 새로운 위상각 ϕ_6가 계산된다. Case 4 경우, Fig. 5 -19(a)에서 링크 1이 슬라이더로 변경되었기 때문에, Fig. 4 -5(d)에서 θ_{g1} (=$\theta_3 + \theta_8 + \theta_2$)의 단위 중력보상기가 무시된다. 이때, Fig. 4 -5(d)의 k_1과 k_2가 병합하여, θ_{g2} (= $\theta_3 + \theta_8$)의 단위 중력보상기를 위한 k_2의 새로운 스프링 상수 (Fig. 5 -25(d)에서 k_{2_new})와 새로운 위상각 ϕ_6이 계산된다. Case 5 경우, Fig. 5 -19(a)에서 링크 1의 질량이 인접한 링크로 병합되었기 때문에, Fig. 4 -5(d)에서 θ_{g1} (= $\theta_3 + \theta_8 + \theta_2$)의 단위 중력보상기가 무시된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Case 1: Watt mechanism

(b) Case 2: Sliding mechanism 1

(c) Case 3: Sliding mechanism 2

(d) Case 4: Sliding mechanism 3

(e) Case 5: Sliding mechanism 4

Fig. 5 -25. Gravity compensators for Fig. 5 -19(a)-(e)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 등가 중력보상기

제 5 장제 1 절1. Cass1에서, Fig. 4 -1(a) 5-link Baranov truss로부터 Fig. 5 -4(a) 4절 링크기구를 얻었다. 여기서, 4절 링크기구는 Fig. 4 -1(b) (또는 Fig. 4 -1(c)) 7-link Baranov truss의 링크 4, 5, 6을 제거함으로써 얻을 수 있다. 5-link Baranov truss와 7-link Baranov truss로부터 유도된 각각의 4절 링크기구에 대한 중력보상기들은 서로 등가이거나 또는 동일하게 설계되어야 한다. Fig. 4 -1(b)로부터 4절 링크기구의 중력보상기를 유도하여, Fig. 5 -9(a) 4절 링크기구의 중력보상기와 비교한다.

Fig. 4 -1(b) 7-link Baranov truss로부터 4절 링크기구를 유도한다. 7-link Baranov truss에서 링크 4, 5 그리고 6을 제거한다. 변형규칙에 의해서, m_4, m_5, m_6, l_{4g}, l_{5g}, l_{6g}, l_{4a}, l_{4b}, l_5 그리고 l_6가 영(zero)이며, θ_4, θ_5, θ_6, θ_7 그리고 θ_9이 무시된다. 이때, 링크 2는 ternary link에서 binary link가 된다 (즉, $\alpha_2 = \beta_2 = 0$). 관절공간 Θ_2를 사용하여, Fig. 4 -1(b)로부터 유도된 4절 링크기구에 관절공간 식 (105)을 결정한다.

$$\Theta = [\theta_1, \theta_3, \theta_8]^T \in R^{3\times 1} \tag{105}$$

Fig. 4 -3에서 4th–6th 행과 열 벡터들은 삭제규칙에 의해서 삭제되며, Fig. 5 -27는 새로운 설계 방정식의 유도과정을 나타낸다. 관절공간의 감소에 의해서 (즉, θ_4, θ_5 그리고 θ_6 제거), Fig. 4 -3에서 $\mathbf{J}^T$와 $\mathbf{f}(\Theta)$의 4th–6th 행 벡터를 삭제한다. $\mathbf{J}^T$의 4th–6th 행 벡터가 삭제되었기 때문에, $\mathbf{M}$의 4th–6th 행과 열 벡터들을 제거한다. $\mathbf{M}$의 차원 감소에 의해서, K_4, K_5, K_6 그리고 $\mathbf{J}^T$의 4th–6th 열 벡터들은 삭제된다. $V_{m_\max,4}$, $V_{m_\max,5}$, $V_{m_\max,6}$ 그리고 $\mathbf{f}(\Theta)$의 4th–6th 열 벡터들은 각각 삭제과정 6과 7의해서 제거된다. 링크 4, 5 그리고 6가 제거되었으므로, $V_{m_\max,1}$와 $V_{m_\max,3}$은 각각 $V_{m_\max,1} = mgl_{1g}$와 $V_{m_\max,3} = C_4$ 이다. 여기서, $C_4 = sqrt(A_4^2 + B_4^2)$, $\phi_4 = \tan^{-1}(B_4/A_4)$, $A_4 = gm_3l_{3g}c_\gamma + gm_2l_{3a}c_{\alpha 3-\gamma}$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그리고 $B_4 = -gm_1 l_{1g} s_\gamma + gm_2 l_{3a} s_{\alpha 3-\gamma}$ 이다. 이때, 해당기구에 관한 사상관계는 식 (106)이다.

$$\Theta_g = \mathbf{J}\Theta + \boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_8 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\gamma \\ -\gamma \\ \phi_4 \end{Bmatrix} \tag{106}$$

Fig. 5 -26는 Fig. 4 -1(b) 7-link Baranov truss로부터 유도된 4절 링크기구의 중력보상기를 나타낸다. 새로운 설계 방정식 Fig. 5 -27을 기반으로, 스프링 상수 k_1, k_2 그리고 k_3은 각각 식 (107)–식 (109)으로 계산된다.

$$k_1 = gm_1 l_{1g} / b_1 h_1 \tag{107}$$

$$k_2 = gm_2 l_{2g} / b_2 h_2 \tag{108}$$

$$k_3 = C_4 / b_3 h_3 \tag{109}$$

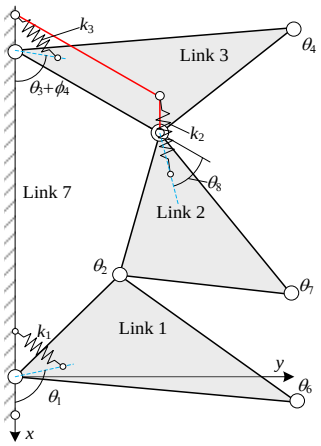


Fig. 5 -26. Gravity compensator of the four bar linkage derived from 7-link Baranov truss.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

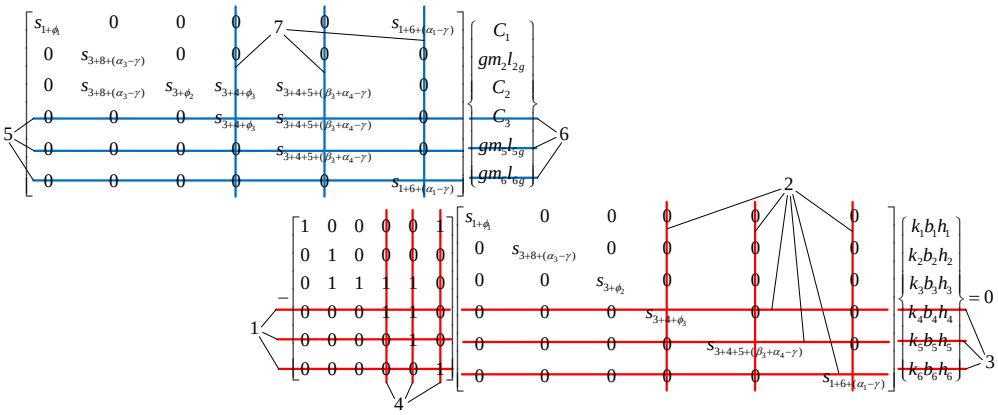


Fig. 5 -27. The design equation for Fig. 5 -26

Fig. 5 -9(a)와 Fig. 5 -26는 4절 링크기구에 대한 중력보상기이므로, Fig. 5 -9(a)와 Fig. 5 -26는 서로 등가여야 한다. Fig. 5 -26의 링크 3은 Fig. 5 -9(a)의 링크 4와 동일하다 (즉, Fig. 5 -26의 θ_8과 θ_3는 각각 Fig. 5 -26의 θ_4와 θ_6에 동일). Fig. 5 -9(a)와 Fig. 5 -26를 비교할 때, Fig. 5 -9(a)의 k_1과 Fig. 5 -26의 k_1는 서로 같은 위치이다. Fig. 5 -9(a)와 Fig. 5 -26에서 각각의 관절공간을 비교할 때, Fig. 5 -26의 관절공간 식 (105)는 Fig. 5 -4(a)의 대체 관절공간 $\Theta_a = [\theta_1, \theta_4, \theta_6]^T$에 해당한다. 관절공간 식 (64)과 $\Theta_a = [\theta_1, \theta_4, \theta_6]^T$을 식 (20)에 적용하면, $\mathbf{J}_{ba} = [1, 0, 0; -1, -1, 0; 0, 1, 0] \in R^{3\times3}$ 이다. 대체 관절공간에 대한 사상행렬은 $\mathbf{JJ}_{ba} = [1, 0, 0; -1, -1, 1; 0, 0, 1] \in R^{3\times3}$ 이다. 식 (21)을 기반으로, Fig. 5 -5으로부터 새로운 설계 방정식 (110)을 유도한다.

$$\begin{bmatrix} s_{1-\gamma} & 0 & 0 \\ 0 & -s_{6+4+(\alpha_2+\beta_2+\pi-\gamma)} & 0 \\ 0 & s_{6+4+(\alpha_2+\beta_2+\pi-\gamma)} & s_{6+\phi_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m_1 g l_{1g} \\ m_2 g l_{2g} \\ C_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{1-\gamma} & 0 & 0 \\ 0 & s_{6+4+(\alpha_2+\beta_2+\pi-\gamma)} & 0 \\ 0 & 0 & s_{6+\phi_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1 b_1 h_1 \\ k_2 b_2 h_2 \\ k_4 b_4 h_4 \end{Bmatrix} = 0 \tag{110}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서, $C_2 = sqrt(A_2^2 + B_2^2)$, $\phi_2 = \tan^{-1}(B_2/A_2)$, $A_2 = gm_4 l_{4g} c_\gamma + gm_2 l_{4b} c_{\alpha 2-\gamma}$ 그리고 $B_1 = -gm_4 l_{4g} s_\gamma + gm_2 l_{4b} s_{\alpha 2-\gamma}$ 이다. 새로운 사상행렬 $\mathbf{JJ}_{ba}$에 의해서, k_2와 k_4는 각각 회전관절 θ_4와 θ_6에 장착된다. 식 (110)으로부터, 스프링 상수 식 (111)-(113)을 계산한다.

$$k_1 = m_1 g l_{1g} / (b_1 h_1) \tag{111}$$

$$k_2 = g m_2 l_{2g} / (b_2 h_2) \tag{112}$$

$$k_4 = C_2 / (b_4 h_4) \tag{113}$$

계산된 스프링 상수들은 Fig. 5 -26의 스프링 상수 식 (107) – 식 (109)과 동일하다. 즉, 다양한 Baranov truss로부터 파생된 같은 기구들에 대한 등가 중력보상기를 얻었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 모의실험

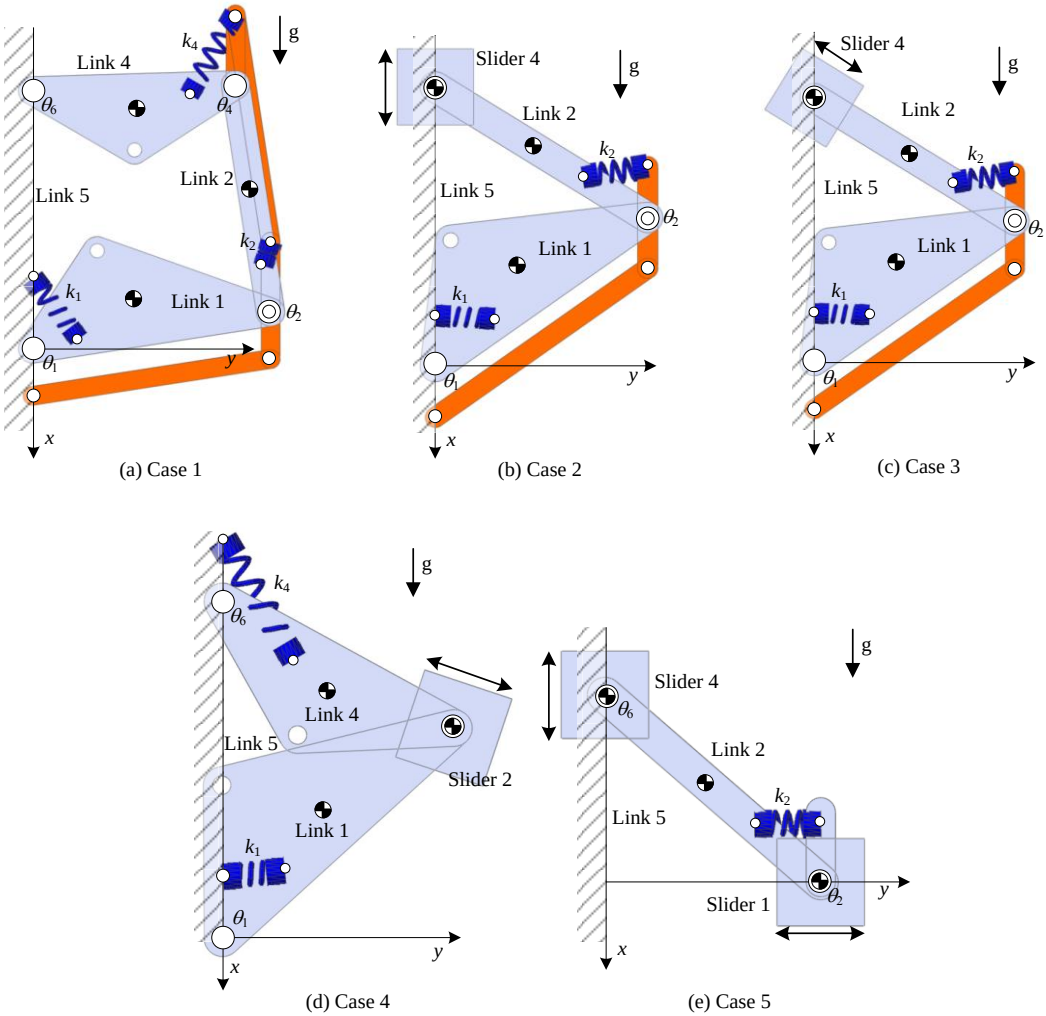
동적 모의실험은 공학적 해석 전산 소프트웨어 Recurdyn (FunctionBay Inc., Seoul, Korea)을 사용하여 실시한다. Fig. 6 -1, Fig. 6 -2 그리고 Fig. 6 -3은 모의실험 모델들을 나타낸다. Table 2-6은 모의실험 모델에 사용한 파라미터와 위상각들을 나타낸다. Fig. 6-2(d), Fig. 6-2(f) 그리고 Fig. 6-3(c)에서만 각각 l_{1g} = 0.209m, l_{4g} = 0.314m 그리고 l_{2g} = 0.213m를 사용한다. Table 7는 모의실험에서 사용한 스프링 상수들을 정리한 것이다. 여기에서, b_i와 h_i는 각각 0.15m와 0.1m이며, 중력은 $\mathbf{g} = [9.807m/s^2, 0]^T$ ($\gamma = 0$)이다. 모의실험에서 회전관절 θ_i는 가상모터로 구동되며, Table 8에는 각각의 모의실험 모델들에서 사용된 가상모터 θ_i를 정리하였다. Fig. 6 -4, Fig. 6 -5 그리고 Fig. 6 -6은 각각의 모의실험 모델(Fig. 6 -1, Fig. 6 -2 그리고 Fig. 6 -3)에 관한 결과들을 나타낸다.

중력벡터가 $\mathbf{g} = 9.807m/s^2[c_\gamma, s_\gamma]^T$이며, γ가 $\gamma = \pi/6$, $\pi/4$ 그리고 $\pi/3$ 일 때, 추가적으로 미끄럼 관절이 고려된 중력보상기 Fig. 5 -10에 대해서 모의실험을 수행한다. 이때, 모의실험 모델은 Table 2의 파라미터를 이용하며, 회전관절 θ_2는 가상모터 $\theta_2(t)$ = 0.4·sin(2πt/30) + 2.4253(radian)으로 구동한다. Table 9는 다양한 γ에서 사용한 스프링 상수를 나타낸다. Fig. 6 -7는 다양한 γ에서 Fig. 5 -10에 관한 모의실험 결과를 나타낸다.

모의실험에서 질량과 스프링에 대한 포텐셜 에너지를 측정한다. 총 포텐셜 에너지 (즉, V_m+V_k)는 질량의 포텐셜 에너지 (즉, V_m)와 스프링의 포텐셜 에너지 (즉, V_k) 합하여 계산된다. 모든 결과 그래프에서(Fig. 6 -4, Fig. 6 -5, Fig. 6 -6 그리고 Fig. 6 -7), 모의실험 모델의 자세가 다양하게 변화하더라도 총 포텐셜 에너지가 일정함을 보인다. 즉, 모의실험 결과는 완전한 중력보상이 이루어짐을 나타낸다. 따라서, 모의실험 결과를 통해서 제안한 설계방법이 타당함을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



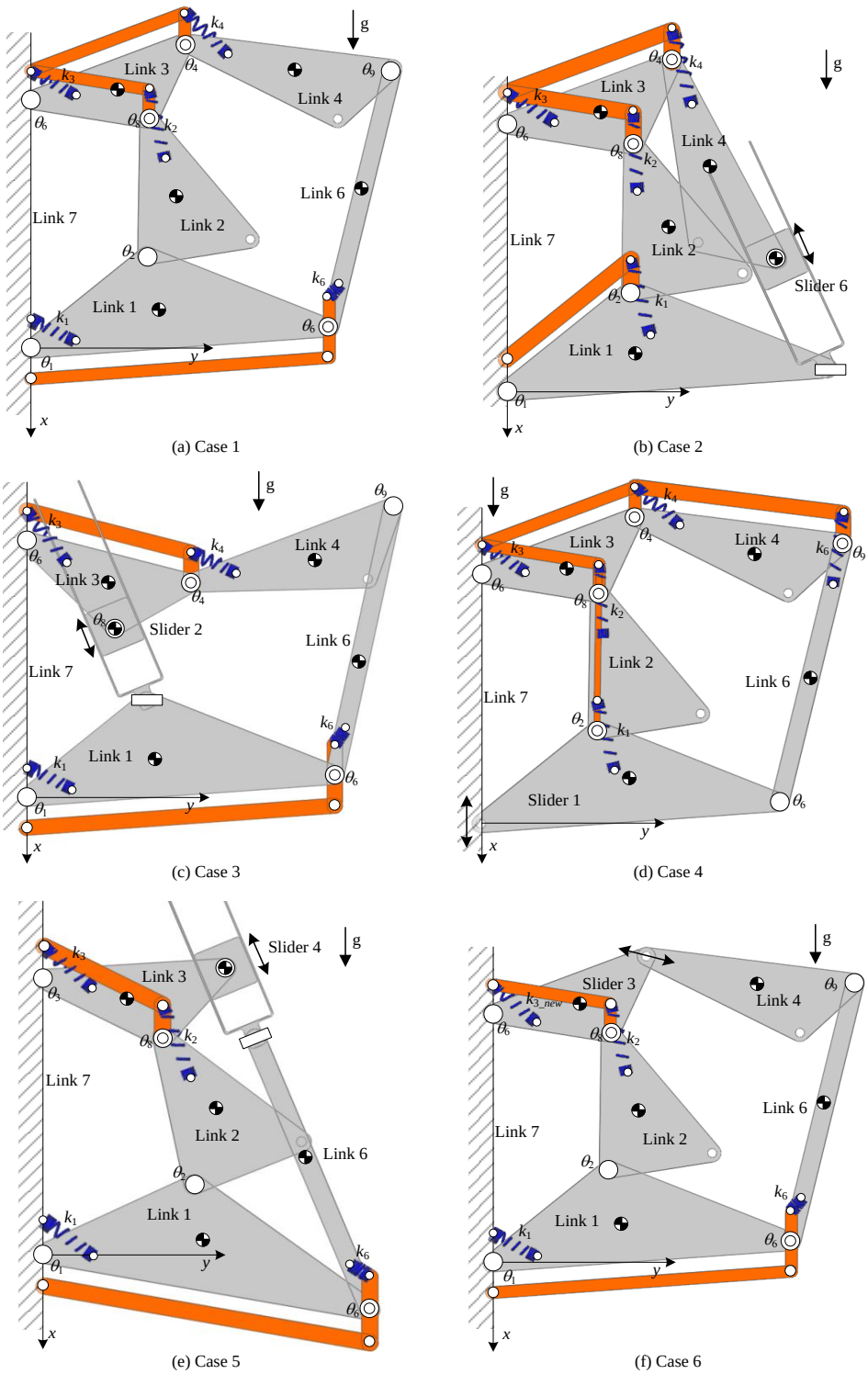
(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

(d) Case 4 (e) Case 5

Fig. 6 -1. Simulation models I

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Case 1 (b) Case 2

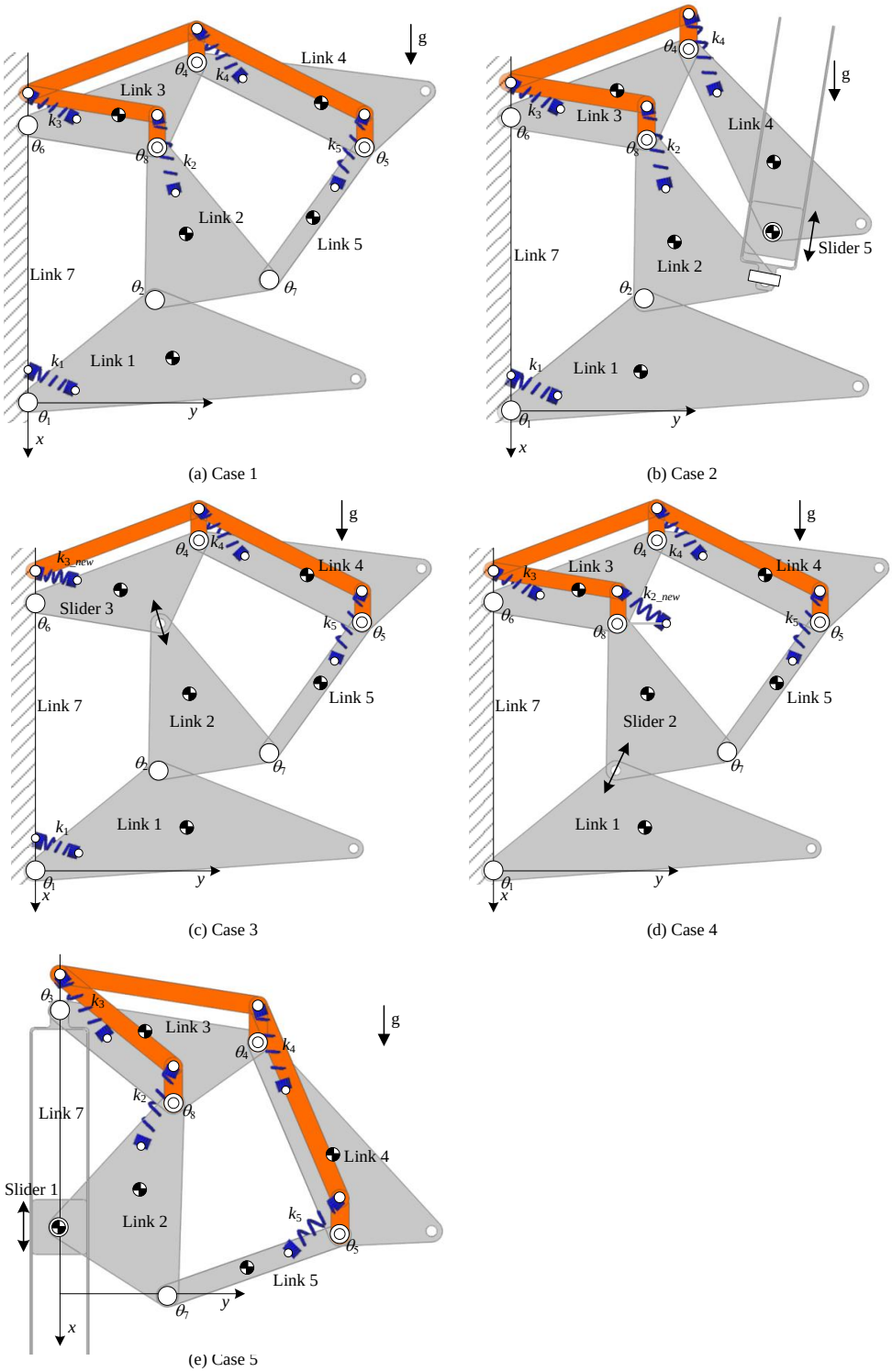
(c) Case 3 (d) Case 4

(e) Case 5 (f) Case 6

Fig. 6 -2. Simulation models II

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

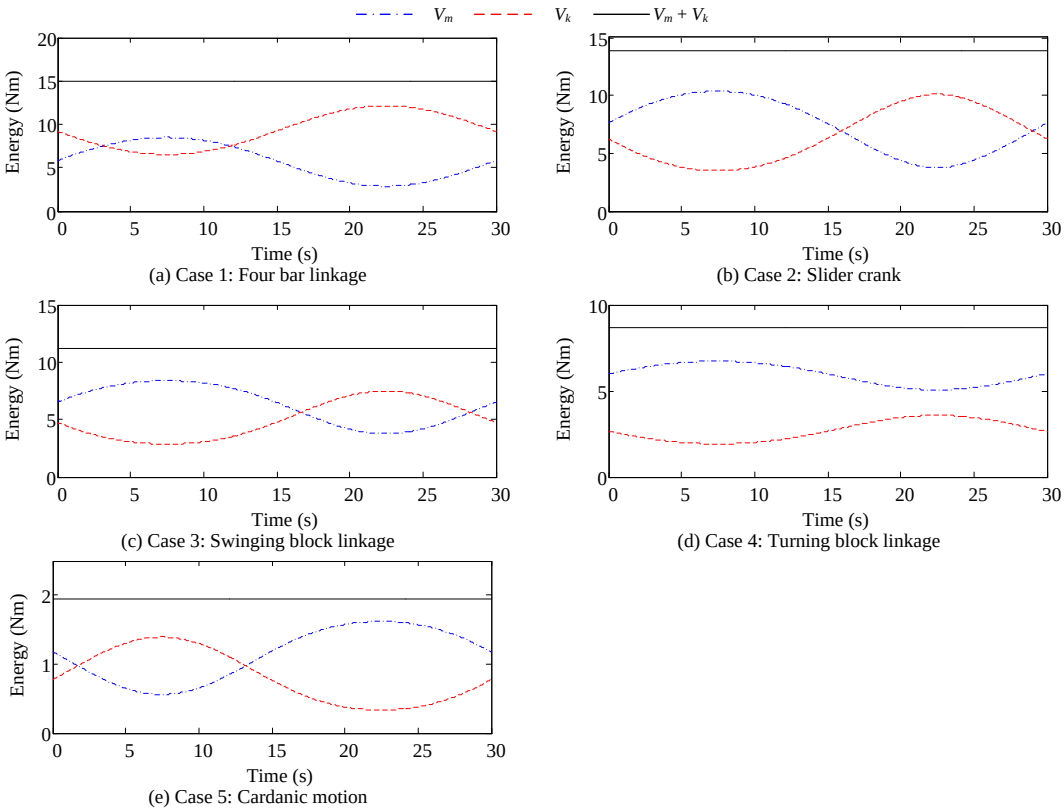
(d) Case 4

(e) Case 5

Fig. 6 -3. Simulation models III

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Case 1: Four bar linkage
(b) Case 2: Slider crank
(c) Case 3: Swinging block linkage
(d) Case 4: Turning block linkage
(e) Case 5: Cardanic motion

Fig. 6 -4. Results of four bar linkage and sliding mechanisms

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

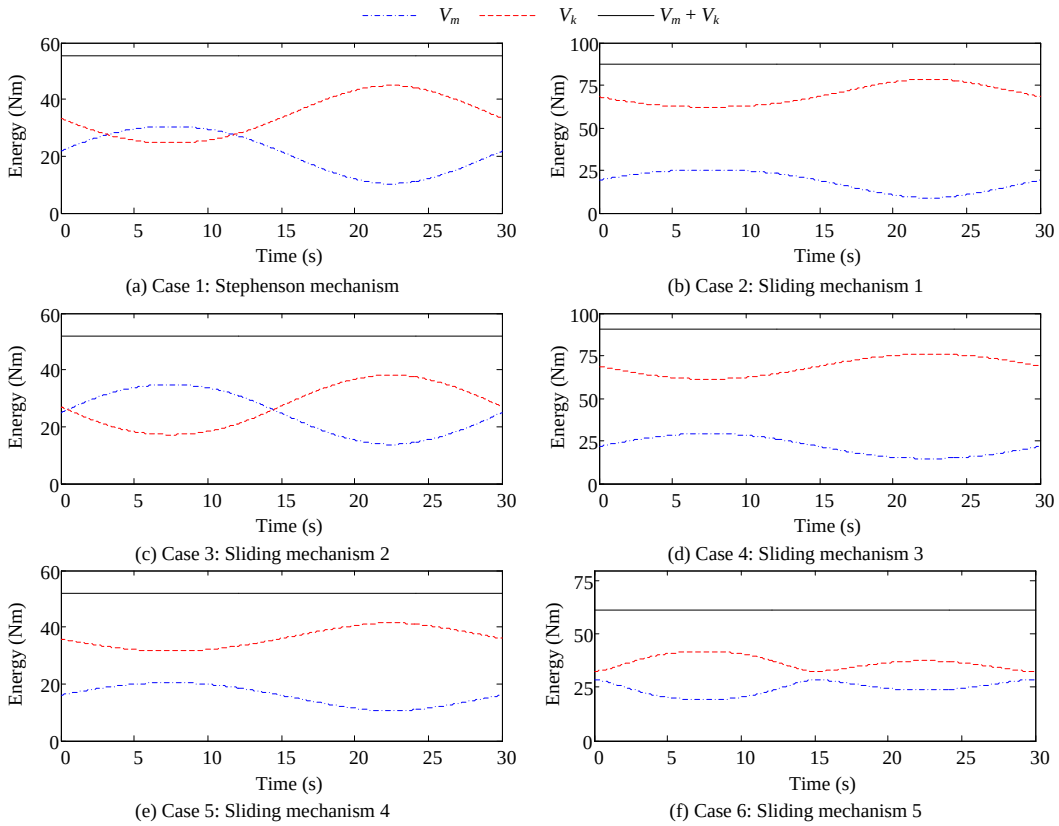


Fig. 6 -5. Results of Stephenson and sliding mechanisms.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

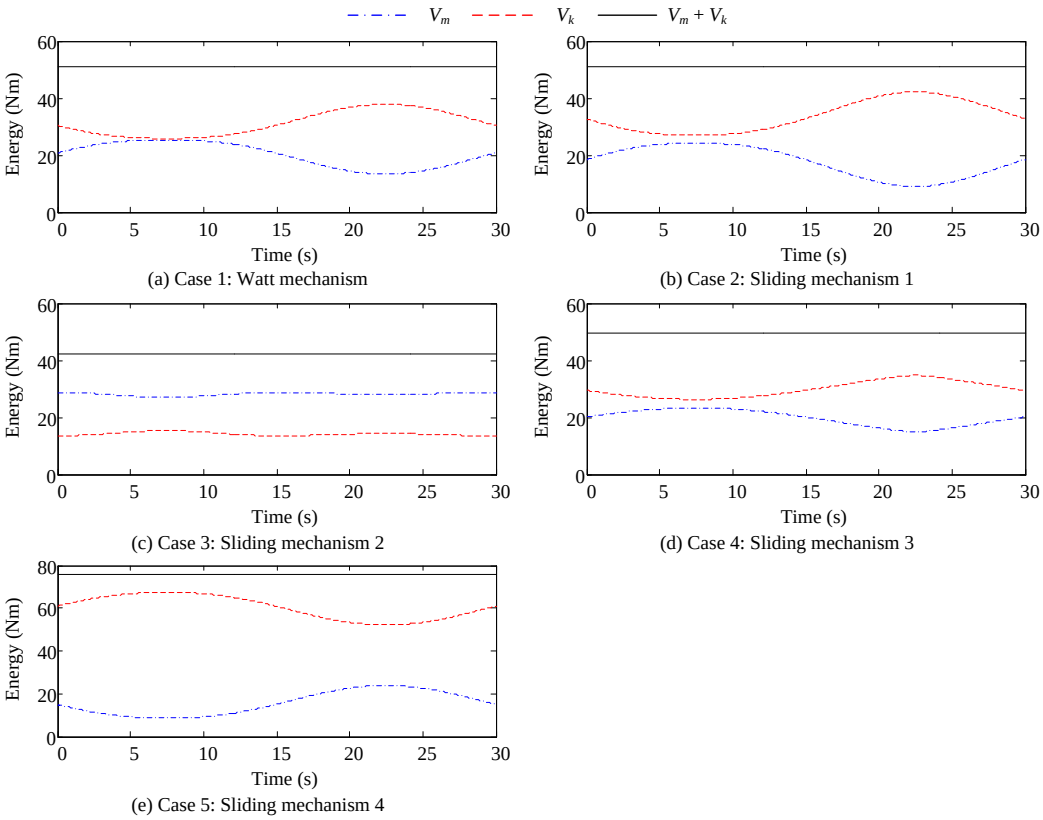


Fig. 6 -6. Results of Watt mechanism and sliding mechanisms

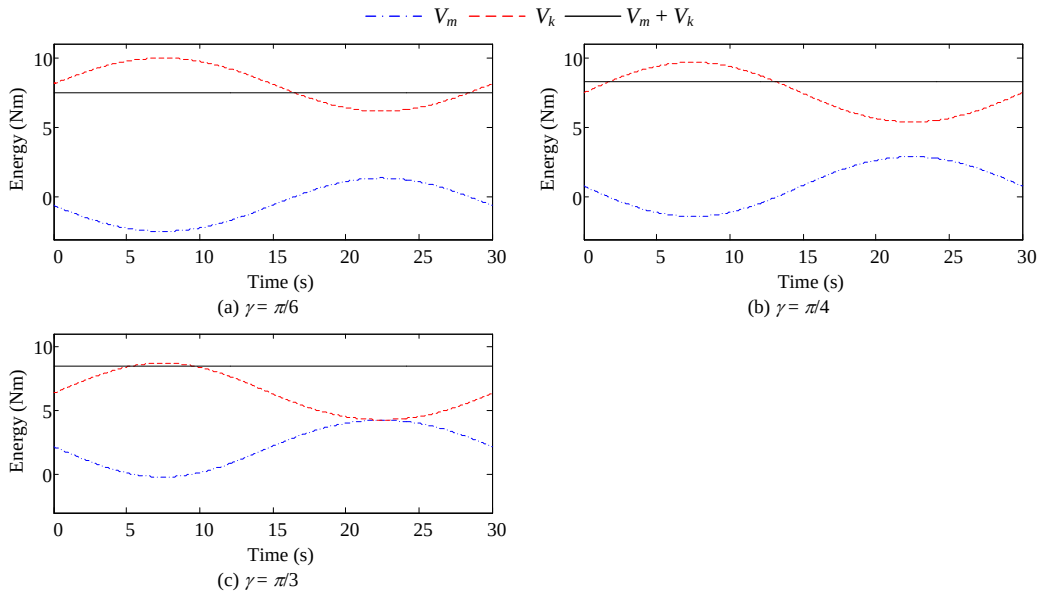


Fig. 6 -7. Results of simulation with the offset angle γ

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2. Parameters and phase angles (radian) for the five-link Baranov truss

	m_i	l_i	l_{ia}	l_{ib}	l_{ig}	α_i	β_i
Link 1	1kg	-	0.510m	0.250m	0.242m	0.237	0.600
Link 2	0.75kg	0.490m	-	-	0.245m	-	-
Link 3	0.25kg	0.229m	-	-	0.114m	-	-
Link 4	0.50kg	-	0.255m	0.430m	0.219m	0.180	0.179
Link 5	-	0.560m	-	-	-	-	-

Table 3. Parameters and phase angles (radian) for the seven-link Baranov truss

	m_i	l_i	l_{ia}	l_{ib}	l_{ig}	α_i	β_i
Link 1	2kg	-	1.000m	0.500m	0.486m	0.185	0.426
Link 2	1kg	-	0.460m	0.350m	0.303m	0.829	0.387
Link 3	0.50kg	-	0.400m	0.550m	0.298m	0.316	0.208
Link 4	0.75kg	-	0.572m	0.700m	0.396m	0.194	0.178
Link 5	0.30kg	0.500m	-	-	0.250m	-	-
Link 6	0.65kg	0.900m	-	-	0.450m	-	-
Link 7	-	0.840m	-	-	-	-	-

Table 4. Phase angles (radian) for Fig. 5 -9

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
ϕ_2	-0.172	-0.172	-	-0.146	-
ϕ_3	-	-	-0.146	-	-

Table 5. Phase angles (radian) for Fig. 5 -18

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
ϕ_1	-0.0739	-	-0.0739	-0.2921	-0.0739	-0.3344
ϕ_2	-	-	-	-0.1044	-	-
ϕ_3	-	-	-	-	-	-
ϕ_4	-0.0420	-0.1044	-0.0420	0.0893	-0.0420	-
ϕ_5	-	0.0893	-	-	-	-0.1090
ϕ_6	-	-	-	-	-	-
ϕ_7	-	-	-	-	-	-0.3344
ψ_1	-	-	-	-	-	-
ψ_2	-	-	-	-	-	0.3346

Table 6. Phase angles (radian) for Fig. 5 -25

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
ϕ_1	-	-	-	-	-0.2921
ϕ_2	-0.0047	-0.0047	-	-	-
ϕ_3	-0.0708	-0.0708	-0.0708	-	-
ϕ_4	-	-	-0.1439	-0.0047	-0.1360
ϕ_5	-	-	-	-0.0708	-0.0708
ϕ_6	-	-	0.3125	1.1653	-
ψ_1	-	-	0.9539	0.9539	-
ψ_2	-	-	-	-	-

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 7. Spring constans k_i (N/m).

Simulation models		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
Fig. 6 -1	Case 1	571.693	280.307	-	71.613	-	-
	Case 2	571.693	280.307		-		
	Case 3	405.778	120.131		-		
	Case 4	405.778	-		71.245		
	Case 5	-	280.307		-		
Fig. 6 -2	Case 1	1055.996	197.983	610.376	194.304	-	191.230
	Case 2	273.315	788.363	1342.989	490.492		-
	Case 3	1055.996	197.983	610.376	194.304		191.230
	Case 4	273.315	788.363	1342.989	490.492		191.230
	Case 5	1055.996	197.983	610.376	-		191.230
	Case 6	1554.280	197.983	204.201	-		632.529
Fig. 6 -3	Case 1	635.374	197.983	715.400	305.213	49.033	-
	Case 2	635.374	197.983	715.400	305.213	-	
	Case 3	942.745	-	588.765	305.219	49.033	
	Case 4	-	686.867	715.400	305.213	49.033	
	Case 5	-	788.363	1223.826	305.213	49.033	

Table 8. Virtual motors for simulation models

Simulation models		Virtual motors
Fig. 6 -1	Case 1	$\theta_1(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) + 1.962$(radian)
	Case 2	$\theta_1(t) = 0.3\cdot\sin(2\pi t/30) + 2.421$(radian)
	Case 3	$\theta_1(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) + 2.421$(radian)
	Case 4	$\theta_1(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) + 2.547$(radian)
	Case 5	$\theta_2(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) + 2.425$(radian)
Fig. 6 -2	Case 1	$\theta_1(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) +1.827$(radian)
	Case 2	$\theta_1(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) +1.828$(radian)
	Case 3	$\theta_1(t) = 0.3\cdot\sin(2\pi t/30) +1.828$(radian)
	Case 4	$\theta_3(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) +1.725$(radian)
	Case 5	$\theta_1(t) = 0.17\cdot\sin(2\pi t/30) +1.581$(radian)
	Case 6	$\theta_4(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30)$
Fig. 6 -3	Case 1	$\theta_1(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) +1.828$(radian)
	Case 2	
	Case 3	
	Case 4	
	Case 5	$\theta_6(t) = 0.4\cdot\sin(2\pi t/30) +1.207$(radian)

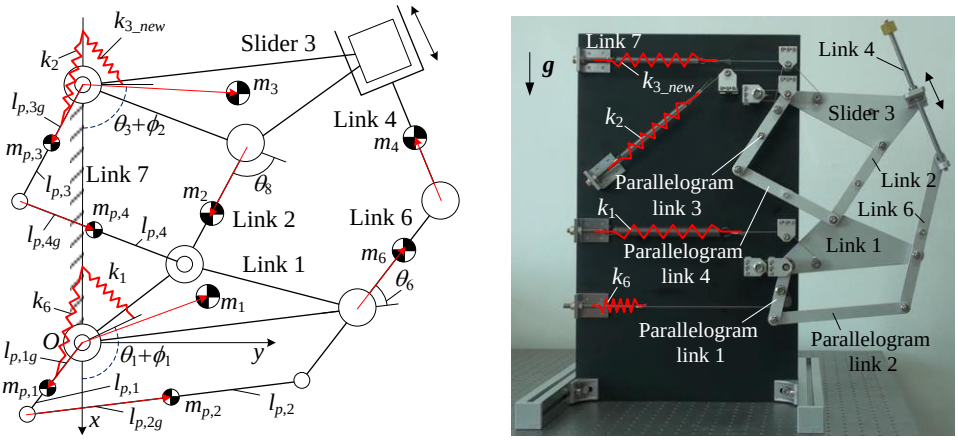
Table 9. Spring constants (N/m)

	$\gamma = \pi/6$	$\gamma = \pi/4$	$\gamma = \pi/3$
k_1	220.241	311.468	381.469
k_2	242.753	198.207	140.153

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 7 장 실험



(a) The equivalent mechanism of Fig. 5-18(f) (b) The practical model

Fig. 7 -1. The fabricated gravity compensator of Fig. 5 -18(f)

Fig. 7 -1는 Fig. 5 -18(f)에 대한 제작모델을 나타낸다. Fig. 5 -18(f)의 제작을 고려하면, Fig. 5 -18(f)에서 링크 4와 링크 2의 종류는 binary link에 해당한다 (즉, α_2, α_4, β_2 그리고 β_4는 영(zero)이다). 제작모델에는 센서와 엑츄에이터가 장착되지 않았다. Table 10은 링크 파라미터를 나타낸다. 제작모델에 대한 위상각은 $\phi_1 = -0.129$과 $\phi_2 = 0.052$이 계산되며, $\alpha_1 = 0.197$, $\beta_1 = 0.501$, $\alpha_3 = 0.308$ 그리고 $\beta_3 = 0.128$ 이다. Fig. 5 -18(f)에서 k_2와 k_6는 평행사변형 링크기구를 사용하여 등가 위치에 부착된다. zero-length 스프링을 구현하기 위해서 와이어와 풀리가 사용되었다.

평행사변형 링크의 질량을 고려한 스프링 상수는 $k_1 = C_1/h_1b_1$, $k_2 = g(m_2l_{2g} + (m_{p3}l_{p,3g} + m_{p,4}l_{p,3}))/b_2h_2$, $k_{3_new} = C_2/b_3h_3$ 그리고 $k_6 = g((m_6l_{6g} + m_4l_6) - (m_{p,1}l_{p,1g} + m_{p,2}l_{p,1}))/b_3h_3$로 계산된다. 여기서, $C_i = sqrt(A_i^2 + B_i^2)$, $\phi_i = \tan^{-1}(B_i/A_i)$, $A_1 = gm_1l_{1g}c_\gamma + g(m_{p,2}l_{p,2g} + (m_4 + m_6)l_{1a})c_{\alpha1-\gamma}$, $B_1 = -gm_1l_{1g}s_\gamma + g(m_{p,2}l_{p,2g} + (m_4 + m_6)l_{1a})s_{\alpha1-\gamma}$, $A_2 = gm_3l_{3g}c_\gamma + gm_4l_{4g}c_{4+\pi+\beta3-\gamma} + g(m_{p,4}l_{p,4g} + m_2l_{3a})c_{\alpha3-\gamma}$ 그리고 $B_2 = -gm_3l_{3g}s_\gamma + gm_4l_{4g}s_{4+\pi+\beta3-\gamma} + g(m_{p,4}l_{p,4g} + m_2l_{3a})s_{\alpha3-\gamma}$ 이다. $m_{p,j}$는 j^{th} 평행사변형 링크의 의미하며, $l_{p,j}$와 $l_{p,ig}$는 각각 j^{th} 평행사변형 링크의 길이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

와 질량중심의 거리를 나타낸다. 스프링 상수는 k_1 = 0.387N/m, k_2 = 0.158N/m, k_{3_new} = 0.249N/m 그리고 k_6 = 0.053N/m을 사용한다. Fig. 7 -2는 제작모델의 다양한 자세를 보여준다. 실험을 통해서, 제작모델이 다양한 자세를 유지할 수 있음을 관찰하였다.

(a) Pose 1 (b) Pose 2 (c) Pose 3 (d) Pose 4

Fig. 7 -2. Various poses of the fabricated gravity compensator.

Table 10. Parameters for the fabricated gravity compensator

	Link 1	Link 2	Link 3	Link 4	Link 6	Link 7
m_i	0.315 kg	0.064 kg	0.361 kg	0.112 kg	0.146 kg	-
l_i	l_{1a} = 0.111 m l_{1b} = 0.220 m	0.150 m	l_{3a} = 0.180 m l_{3b} = 0.221 m	0.232 m	0.170 m	0.288 m
l_{ig}	0.110 m	0.075 m	0.144 m	0.091 m	0.039 m	-
$m_{p,j}$	0.087 kg	0.073 kg	-	0.068 kg	0.113 kg	-
$l_{p,jg}$	0.059 m	0.110 m	-	0.090 m	0.081 m	-
$l_{p,j}$	0.090 m	0.220 m	-	0.180 m	0.150 m	-
h_i	0.050 m	0.050 m	0.050 m	-	0.060 m	-
b_i	0.050 m	0.030 m	0.050 m	-	0.040 m	-

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 8 장 토의

[11]에서 1자유도 중력보상기의 포텐셜 에너지는 식 (114)로 계산하였다.

$$PE = \frac{k(h^2 + b^2)}{2} + kbh\cos(\theta) \tag{114}$$

여기서, k와 θ는 각각 스프링 상수와 1자유도 중력보상기의 회전각도를 의미한다. 포텐셜 에너지는 $k(h_2 + b_2)$의 정수 값에서 코사인 함수를 가지며 달라진다. 이번 연구에서, 동일한 관절에 장착된 각각의 1자유도 중력보상기들은 하나의 등가 중력보상기로 병합된다. 두 개의 1자유도 중력보상기들이 같은 관절에 장착되는 경우를 고려하자. 두 개의 1자유도 중력보상기들의 포텐셜 에너지는 $PE_1 = k_1b_1h_1\cos(\theta) + k_1(h_1^2 + b_1^2)/2$와 $PE_1 = k_2b_2h_2\cos(\theta + \phi) + k_2(h_2^2 + b_2^2)/2$로 계산된다. 여기서, ϕ는 임의의 오프셋 각도를 나타낸다. 등가 중력보상기의 포텐셜 에너지는 유사하게 $PE_e = k_eb_eh_e\cos(\theta + \phi_e) + k_e(h_e^2 + b_e^2)/2$으로 결정할 수 있다. $h_1 = h_2 = h_e = h$와 $b_1 = b_2 = b_e = b$라고 가정할 때, 식 (115)을 만족해야 한다.

$$k_1bh\cos(\theta) + k_2bh\cos(\theta + \phi) = k_ebh\cos(\theta + \phi_e) \tag{115}$$

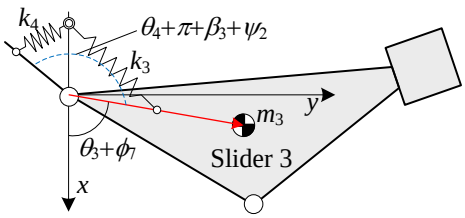
k_e와 ϕ_e는 $k_e = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + 2k_1k_2\cos(\phi)}$ 와 $\phi_e = \tan^{-1}(k_2\sin(\phi)/(k_1 + k_2\cos(\phi))$으로부터 결정된다. k_e는 ϕ의 임의의 값에 대해서 $(k_1 + k_2) \geq k_e \geq |k_1 - k_2|$의 범위를 가진다. $\phi = 0$ 일 때, k_e는 $k_1 + k_2$의 최대값을 가진다. 즉, 오프셋 각도가 영이 아닐 때(즉, $\phi \neq 0$), k_e는 항상 $k_1 + k_2$값 보다 작다.

두 개의 1자유도 중력보상기의 총 포텐셜 에너지는 식 (115)을 고려하여 $PE_1 + PE_2 = k_ebh\cos(\theta + \phi) + (k_1 + k_2)(h^2 + b^2)/2$로 계산된다. 등가 중력보상기의 포텐셜 에너지 정수는 $k_e(h^2 + b^2)$로 결정된다. $\phi \neq 0$이면 $k_1 + k_2 > k_e$이기 때문에, $k_e(h^2 + b^2)$의 포텐

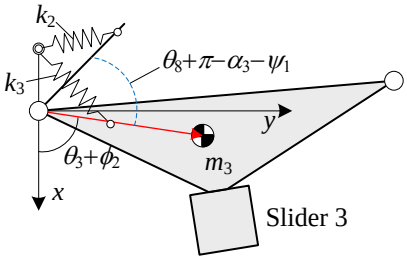
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

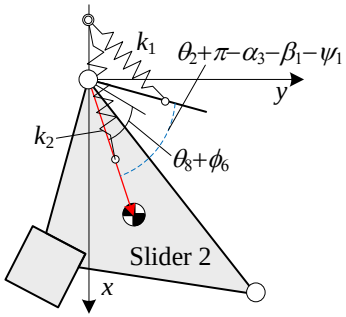
셜 에너지 정수는 항상 $(k_1 + k_2)(h^2 + b^2)/2$ 값 보다 작다. 여러 1자유도 중력보상기가 동일한 관절에 장착될 때, 등가 중력보상기는 두 개의 1자유도 중력보상기를 반복적으로 결합함으로써 얻을 수 있다. 즉, 모든 등가 중력보상기의 포텐셜 에너지는 항상 영이 아닌 오프셋 각도들에 대한 본래의 중력보상기들의 총 포텐셜 에너지 값 보다 작다.



(a) Original form of k_{3_new} in Fig. 5-18(f)



(b) Original form of k_{3_new} in Fig. 5-25(c)



(c) Original form of k_{2_new} in Fig. 5-25(d)

Fig. 8 -1. The original of k_{i_new} for the three simulation models

모의실험 모델에서 k_{i_new}의 스프링 상수는 서로 다른 두 개의 스프링들로부터 비롯된다. 예를 들면, Fig. 5 -18(f)에서 k_{3_new}는 k_3과 k_4을 병합하여 얻어진다. 이때, k_3과 k_4은 k_{3_new}에 대한 원래의 스프링들을 나타낸다. Fig. 8 -1은 모의실험 모델들에서 k_{i_new}에 대한 원래의 스프링들을 나타낸다. Fig. 8 -2는 제 6 장 모의실험에서 측정한 본래의 스프링들의 포텐셜 에너지와 k_{i_new}의 포텐셜 에너지들을 나타낸다. Table 11은 본래의 스프링들에 대한 스프링 상수를 정리한 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

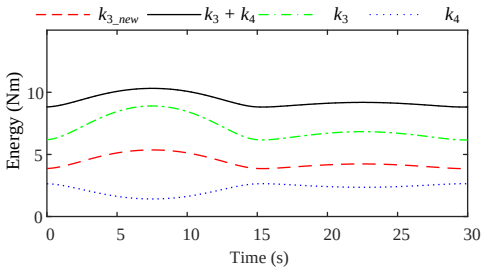
k_{i_new}의 포텐셜 에너지는 본래 스프링의 포텐셜 에너지의 합과 비교하면 더 작은 값을 가진다. Fig. 5-18(f), Fig. 5-25(c)-(d) 그리고 Fig. 8-1를 고려하면, Fig. 5-18(f)와 Fig. 5-25(c)-(d)에서 k_{i_new}는 Fig. 8-1에서 본래의 스프링들 사이에 공간적으로 위치한다. 즉, k_{i_new}의 변형길이는 항상 본래 스프링들의 변형길이의 합보다 작다. 포텐셜 에너지는 스프링 변형길이의 크기와 스프링 상수에 비례하기 때문에, k_{i_new}와 본래 스프링 사이에 포텐셜 에너지의 차이도 크다. b_i와 h_i가 모든 i에서 일정하기 때문에, 모든 스프링들의 초기 변형길이는 동일하다. Fig. 5-18(f)의 k_{3_new}에 대한 본래 스프링들 사이의 각도가 둔각이기 때문에, Fig. 8-2(a)에서 큰 포텐셜 에너지 차이가 발생한다. Fig. 5-25(c)의 k_{3_new}와 Fig. 5-25(d)의 k_{2_new}에 대한 본래 스프링들 사이의 각도가 예각이기 때문에, Fig. 8-2(b)와 Fig. 8-2(c)에서 크지 않는 포텐셜 에너지 차이가 발생한다. k_{3_new}경우, Table 11에 의하면 k_{3_new}의 스프링 상수는 본래 스프링 k_3의 값 보다 작다. k_{3_new}와 k_{2_new}경우, k_{i_new}의 스프링 상수는 본래 스프링들의 값 보다 크다. 낮은 포텐셜 에너지는 작은 변형길이 또는 작은 스프링 상수값을 나타낸다. 즉, 작은 힘이 기구에 작용되기 때문에, 스프링들을 병합하는 것은 실제 설계에서 유익하다.

Table 11. Original spring constants k_i (N/m) for k_{i_new}

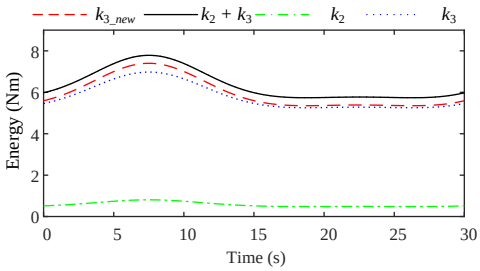
	k_1	k_2	k_3	k_4
Fig. 5-18(f)	-	-	355.362	153.723
Fig. 5-25(c)	-	139.164	473.270	-
Fig. 5-25(d)	635.374	197.983	-	-

Collection @ chosun

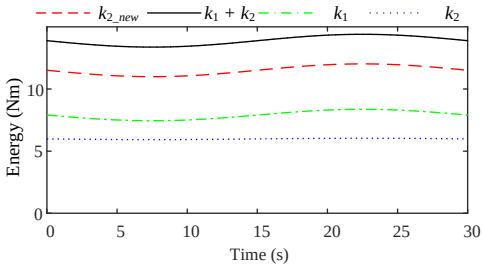
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Potential energy of the k_{3_new} in Fig. 5-18(f) and k_i in Fig. 8-1(a)



(b) Potential energy of the k_{3_new} in Fig. 5-25(c) and k_i in Fig. 8-1(b)



(c) Potential energy of the k_{2_new} in Fig. 5-25(d) and k_i in Fig. 8-1(c)

Fig. 8 -2. Temporal variations of potential energy for the k_{i_new} and original springs.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 9 장 결론

본 연구는 중력보상기 설계를 용이하게 하기 위한 변형 방법을 제안한다. 기구학 이론에서 대응 링크기구와 슬라이딩 기구는 Baranov truss로부터 유도 가능하다. 본 연구에서는 대응 링크기구와 슬라이딩 기구에 대한 중력보상기 또한 유사하게 Baranov truss의 중력보상기로부터 얻을 수 있음을 보였다. 다양한 설계 예제와 모의실험 및 실험으로부터 아래 결론을 도출하였다.

1. Baranov truss에 대한 기구학 및 포텐셜 에너지 계산만 수행(중력보상기 설계)하여 다양한 링크기구의 중력보상기를 기구학 및 에너지 계산 없이 유도할 수 있다.
2. 중력보상 관점에서, 링크의 제거는 해당 링크에 대한 파라미터와 관절을 중력보상 설계 식에서 제거 또는 무시하는 것과 동일하다. 해당 관절 삭제에 의해서, 관절공간이 축소되므로 삭제규칙이 적용 가능하다.
3. 대응 링크기구와 파생기구의 중력보상기들은 Baranov truss의 중력보상기에 삭제규칙을 연속으로 적용하여 얻을 수 있다.
4. 기구의 자세 계산시 미끄럼 관절 변위가 필요할 경우, 해당되는 대응 링크기구 또는 Baranov truss의 포텐셜 에너지 식과 설계 방정식들은 미끄럼 관절의 변위 (또는 미끄럼 운동)가 반영되도록 재구성되어야 한다. 이때, 기존의 포텐셜 에너지 식으로부터 새로운 포텐셜 에너지 식이 유도될 수 있다. 이 경우에도, 변형규칙은 재구성된 설계 방정식에 적용할 수 있다.
5. 등가 스프링의 포텐셜 에너지는 본래 스프링들의 포텐셜 에너지의 합 보다 작다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6. 서로 다른 Baranov truss에서 동일한 기구가 유도될 수 있듯이, 서로 다른 Baranov truss의 중력보상기로부터 동일하거나 등가인 중력보상기를 얻을 수 있다.

7. Multi-loop을 가지는 기구는 다양한 관절공간으로 표현될 수 있으며, 다양한 관절공간 수만큼 등가 중력보상기를 갖는다.

이번 연구에서 사용한 기구합성 개념들은 (즉, Baranov truss 개념과 대응 링크기구 개념) 관절공간을 축소시킨다. 즉, 공간사상기법에서 관절공간의 축소에 대해서 고려하였다. Assur group 개념을 통해서, 각각의 기구들을 결합하여 새로운 기구를 얻을 수 있다[38]. 이 경우, 관절공간이 확장되며, 확장된 관절공간을 고려한 새로운 설계 방법이 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] R. Kram, A. Domingo, and D. P. Ferris, Effect of reduced gravity on the preferred walk-run transition speed, *J Exp Biol*, 200 (4) (1997) 821 – 826.

[2] M. Frey, G. Colombo, M. Vaglio, R. Bucher, M. Jorg, and R. Riener, A novel mechatronic body weight support system, *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Eng.*, 14 (3) (2006) 311-321.

[3] A. Agrawal and S. K. Agrawal, Design of gravity balancing leg orthosis using non-zero free length springs, *Mechanism and machine theory*, 40 (6) (2005) 693-709.

[4] S. Hirose, T. Ishii, and A. Haishi, Float arm V: hyper-redundant manipulator with wire-driven weight-compensation mechanism, *Proc. of the 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan (2003) 368 – 373.

[5] K. A. Wyrobek, E. H. Berger, H. F. M. Van der Loos, and J. K. Salisbury, Towards a personal robotics development platform: Rationale and design of an intrinsically safe personal robot, *Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Pasadena, CA (2008) 2165 – 2170.

[6] H.S. Kim and J.B Jae, Multi-DOF Counterbalance Mechanism for a Service Robot Arm, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 19 (6) (2014) 1756 – 1763.

[7] C. M. Gosselin and J. Wang, On the design of gravity-compensated six-degree-of-freedom parallel mechanisms, *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium (1998) 2287 – 2294.

[8] A. Russo, R. Sinatra, and F. Xi, Static balancing of parallel robots, *Mechanism and Machine Theory*, 40 (2) (2005) 191 – 202.

[9] T. Liu, F. Gao, X. Zhao, and C. Qi, Static balancing of a spatial six-degree-of-freedom decoupling parallel mechanism, *J. of Mechanical Science and Technology*, 28 (1) (2014)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

191 – 199.

[10] C. Cho and S. Kim, Static balancer for the neck of a face robot, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228 (3) (2014) 561 – 568.

[11] R.M. Nathan, A constant force generation mechanism, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 107 (4) (1985) 508 – 512.

[12] N. Ulrich and V. Kumar, Passive mechanical gravity compensation for robot manipulators, *Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Sacramento, USA (1991) 1536 – 1541.

[13] K. Koser, A cam mechanism for gravity-balancing, *Mechanics Research Communications*, 36 (4) (2009) 523 – 530.

[14] G. Endo, H. Yamada, A. Yajima, M. Ogata, and S. Hirose, A passive weight compensation mechanism with a non-circular pulley and a spring, *Proc. of the 2010 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska (2010) 3843 – 3848.

[15] Morita, F. Kuribara, Y. Shiozawa, and S. Sugano, A novel mechanism design for gravity compensation in three dimensional space, in Advanced Intelligent Mechatronics, *Proc. of the 2003 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, Kobe, Japan (2003) 163 – 168.

[16] C. Cho, W. Lee, J. Lee, and S. Kang, A 2-dof gravity compensator with bevel gears, *J. of Mechanical Science and Technology*, 26 (9) (2012) 2913 – 2919.

[17] B. van Ninhuijs, B. L. J. Gysen, J. W. Jansen, and E. A. Lomonova, Multi-degree-of-freedom spherical permanent magnet gravity compensator for mobile arm support systems, *Proc. of the 2013 IEEE Int. Electr. Mach. & Drives Conf. (IEMDC)*, Chicago, USA (2013) 1443 – 1449.

[18] B. M. Wisse, W. D. van Dorsser, R. Barents, and J. L. Herder, Energy-free adjustment of gravity equilibrators using the virtual spring concept, *Proceedings of the 2007 IEEE 10th*

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

International Conference on Rehabilitation Robotics, Noordwijk, Netherlands (2007) 742-750.

[19] W. D. van Dorsser, R. Barents, B. M. Wisse, M. Schenk, and J. L. Herder, Energy-free adjustment of gravity equilibrators by adjusting the spring stiffness, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (9) (2008) 1839-1846.

[20] R. Barents, M. Schenk, W.D. van Dorsser, B.M. Wisse, and J.L. Herder, Spring-to-spring Balancing as Energy-free Adjustment Method in Gravity Equilibrators, *Transactions of the ASME J. of Mechanical Design*, 133 (6) (2011) 061010-1 – 061010-10.

[21] N. Takesue, T. Ikematsu, H. Murayama, and H. Fujimoto, Design and prototype of variable gravity compensation mechanism (VGCM), *Journal of Robotics and Mechatronics*, 23 (2) (2011) 249-257.

[22] M. A. Lacasse, G. Lachance, J. Boisclair, J. Ouellet, and C. Gosselin, On the design of a statically balanced serial robot using remote counterweights, *Proc. of the 2013 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany (2013) 4189-4194.

[23] Z. W. Yang and C. C. Lan, An adjustable gravity-balancing mechanism using planar extension and compression springs, *Mechanism and Machine Theory*, 92 (0) (2015) 314-329.

[24] S. Briot and V. Arakelian, A New Energy-free Gravity-compensation Adaptive System for Balancing of 4-DOF Robot Manipulators with Variable Payloads, *in Proc of the 14th IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan (2015) 179 – 187

[25] G.J. Walsh, D.A. Streit, and B.J. Gilmore, Spatial spring equilibrator theory, *Mechanism and Machine Theory*, 26 (2) (1991) 155-170.

[26] D. A. Streit and B. J. Gilmore, 'Perfect' Spring Equilibrators for Rotatable Bodies, *J. of Mechanical Design*, 111 (4) (1989) 451 – 458.

[27] S.K. Agrawal, and A. Fattah, Gravity-balancing of spatial robotic manipulators, *Mechanism*

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

and Machine Theory, 39 (12) (2004) 1331 – 1344.

[28] S. Deepak, Static balancing of rigid-body linkages and compliant mechanisms, PhD. dissertation, 2012.

[29] P.Y Lin, W.B. Shien, and D.Z. Chen, Design of Statically Balanced Planar Articulated Manipulators With Spring Suspension, *IEEE trans. on Robotics*, 28 (1) (2012) 12 – 21.

[30] Y.-Y. Lee and D.-Z. Chen, Determination of spring installation configuration on statically balanced planar articulated manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 74 (0) (2014) 319 – 336.

[31] C.H. Cho, and S.C. Kang, Design of a Static Balancing Mechanism for a Serial Manipulator With an Unconstrained Joint Space Using One-DOF Gravity Compensators, *IEEE Trans. on Robotics*, 30 (2) (2014) 421 – 431.

[32] S.H. Kim, and C.H. Cho. Design of planar static balancer with associated linkage, *Mechanism and Machine Theory*, 81 (0) (2014) 79 – 93.

[33] S.H. Kim, and C.H. Cho. Design of Gravity Compensators using associated linkages of Stephenson and Watt Mechanism, *Mechanism and Machine Theory*, 102 (0) (2016) 68 – 85.

[34] A.G. Erdman, G.N. Sandor and S. Kota, *Mechanism Design Analysis and synthesis vol. 1*, Prentice Hall, (2001) 526 – 530.

[35] L.-W. Tsai, *Mechanism design: enumeration of kinematic structures according to function*, CRC press, (2010) 112 – 139.

[36] N. I. Manolescu, A method based on Baranov Trusses, and using graph theory to find the set of planar jointed kinematic chains and mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 8 (1) (1973) 3 – 22.

[37] N. Rojas and F. Thomas, On closed-form solutions to the position analysis of Baranov trusses, *Mechanism and Machine Theory*, 50 (0) (2012) 179 – 196.

[38] Peter Mitrouchev, Symbolic structural synthesis and a description method for planar kinematic chains in robotics, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 20 (5) (2001) 777-794.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

CURRICULUM VITAE

Sanghyung Kim
E-mail: qw3778@naver.com

Internartional Journal

[1] **S.H. Kim**, and C.H. Cho, Design of planar static balancer with associated linkage, *Mechanism and Machine Theory*, 81 (0) (2014) 79 – 93.

[2] **S.H. Kim**, and C.H. Cho, Incomplete gravity compensator for a 4-DOF manipulator, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29 (10) (2015) 4417-4426.

[3] **S.H. Kim**, and C.H. Cho, Design of Gravity Compensators using associated linkages of Stephenson and Watt Mechanism, *Mechanism and Machine Theory*, 102 (0) (2016) 68 – 85.

[4] **S.H. Kim**, and C.H. Cho, Transformation of static balancer from truss to linkage, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30 (5) (2016) 2093 – 2104.

[5] **S.H. Kim**, and C.H. Cho, Static Balancer of a 4-DOF Manipulator with Multi-DOF Gravity Compensator, *Journal of Mechanical Science and Technology* (Submitted in 2016).

Domestic conference

[1] **김상형**, 조창현, 대응 링크기구를 이용한 슬라이더 크랭크의 중력보상기 설계 (Design of static balancer for slider crank using associated linkage), 제 9회 한국로봇종합학술대회, (2014) 591 – 594.

[2] **김상형**, 조창현, Stephenson 기구의 파생기구 중력보상기 개발 (Static balancer for the derived mechanism of Stephenson mechanism), 제 10회 한국로봇종합학술대회, (2015) 3 – 4.

[3] **김상형**, 조창현, 인간형 4 자유도 메니퓰레이터의 중력보상기 설계 (Design of a static balancer fro a humanlike 4-dof manipulator), 제 11회 한국로봇종합학술대회, (2016) 19 – 20.

Collection @ chosun