

4절 메커니즘을 이용한 준정적 포복 시스템

Quasi-Static Crawling System Using a Four Bar Mechanism

김해수, 김민건, 임남식, 김희국, 이병주
(Hae-Soo Kim, Min-Gun Kim, Nam-Sik Yim, Wheekuk Kim, and Byung-Ju Yi)

Abstract : In this work, the quasi-static crawling of the four-bar mechanism is investigated. Since the crawling of the mechanism is based on sliding of contact points of the mechanism with the ground, interaction forces and friction forces at contact points of the mechanism with the ground should be computed. For this purpose, we introduce the concept of imaginary joints to find these forces and treat the closed mechanism as a serial one. Lastly, the required torques for the mechanism to crawl with respect to various configurations of the mechanism on a flat ground with uniform friction coefficient, based on sliding conditions of the mechanism in quasi-static equilibrium, are investigated.

Keywords : four-bar mechanism, quasi-static crawling, gait, force analysis

I. 서론

일반 산업용 로봇 시스템들은 자동화 공정작업을 위해 예정된 장소에 설치되어 주어진 작업을 수행하도록 사용된다. 그러므로, 공장의 여러 위치에 산재해 있는 기기들의 점검이나 보수유지 또는 이동을 요하는 작업물의 처리에 적합한 이동기능을 가지고 있지 않다. 이에 따라, 주행로봇이나 보행로봇에 관한 연구가 많이 진행되어 오고 있으며 주행로봇의 경우는 보행로봇에 비하여 평평한 지면에서는 우수한 성능을 나타내지만, 반대로 지면이 고르지 못하거나 진흙과 같이 딱딱하지 않은 지면에서는 보행로봇이 주행로봇에 비하여 훨씬 우수한 성능을 나타낸다.

보행로봇의 경우에 있어서는 보행시 정적 안정성에 따라 정적보행(static walking; crawling)과 동적보행(dynamic walking)으로 분류될 수 있는데 정적보행은 대부분 곤충이나 네 다리를 가지고 있는 동물들이 포복과 같은 매우 낮은 속도로 이동하는 형태에 적용되며 보행시 항상 정적으로 안정하도록 중량중심이 메커니즘의 지지점들을 연결하여 형성되는 볼록한 다각형(convex hull) 내에 항상 존재하도록 보폭이나 속도를 조절되어야 한다[1]. 특히, 빠른 속도로 인해 관성효과가 커지거나 외력이 있는 경우는 이들로 인한 유효질량중심이 고려되어야 한다[2]. 한편, 동적보행은 두 다리 또는 네 다리를 가지는 동물들이 빠른 속도로 이동할 때의 형태로서 보행시 위와 같이 정적인 안정성을 유지하지 않지만 동적으로 안정성을 유지하는 형태를 나타낸다.

이러한 보행로봇의 설계와 보행기법에 관련된 연구는 주로 곤충과 동물의 구조를 고려하거나 이들의 보행형태에 많이 의존하고 있다. 예를 들면, 포복의 경우는 네 개의 다리 이상을 가지고 있는 곤충의 걷는 형태(gait)를, 그리고 보행

(walking)의 경우는 사람, 캥거루, 말, 개 등과 같이 두 개, 또는 네 개의 다리를 가지는 동물의 보행형태에 관한 연구가 진행되고 있다[3]-[5]. 곤충이나 동물의 경우를 살펴보면 포복이나 walking 이외에도 pacing, trotting, galloping, running, hopping, bouncing 등과 같은 여러 형태의 걷는 방식들이 있으며 이들에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다[4].

한편, 수많은 파이프와 그 밖의 공장 시설물로 인하여 굴곡이 심하고 비교적 협소한 터널같은 환경에 설치된 기기들을 수리 보수하기 위해서는 뱀과 같은 형태의 다관절로 구성된 이동로봇이 적합하며 최근에는 이러한 다자유도 관절링크모듈의 개발과 이들로 구성된 뱀과 같은 형태의 이동기능을 가지는 다자유도 로봇시스템에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며 한 예로서 이들 링크모듈의 변형을 조절하여 이동하는 로봇에 관한 연구결과가 소개되고 있다[6][7].

그러므로, 본 연구에서도 이러한 뱀과 같은 형태의 다자유도 링크모듈로 구성되는 이동로봇의 단순한 형태로서 그림 1과 같이 진행방향과 지면에 수직인 방향이 이루는 평면에서 운동하는 4절 메커니즘의 포복에 관하여 조사한다. 그러나, 기존의 걸음새 이동기법과는 달리 4절 메커니즘에 있어서 두 개의 구동관절을 이용하여 메커니즘이 정적평형을 이루도록 하고 지면과 메커니즘과의 접촉점에서의 반력 크기를 조절함으로써 진행 방향으로의 미끄러짐을 유발하여 이동하는 준정적 평형상태의 포복방법을 사용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저, 4절 메커니즘의 두 접촉점에서의 반력을 구하기 위하여 한 접촉점에서의 반력 방향으로는 가상관절이 부착되었다고 가정하고 다른 접촉점에서의 반력은 출력토크로 가정한다. 이때 4절 메커니즘은 직렬구조를 가지는 메커니즘으로 가정될 수 있으며 이러한 가상 직렬 메커니즘의 반력을 일반 직렬 메커니즘의 해석방법[8]을 이용하여 구한다. 그리고 4절 메커니즘의 포복 걸음새와 미끄러짐 조건에 관하여 간략하게 기술한 후 평형을 유지하면서 지면과의 접촉점에서 미끄러짐이 발생되는 구동관절의 토크를 메커니즘의 다양한 형상에 관하여

접수일자 : 2001. 6. 26., 수정완료 : 2001. 12. 24.

김해수 : 인천기능대학 컴퓨터기계설계과(hskim@kopo.or.kr)

김민건 : 강원대학교 기계·메카트로닉스(kmg@kangwon.ac.kr)

임남식 : 고려대학교 대학원 제어계측공학과(esper@hanmail.net)

김희국 : 고려대학교 제어계측공학과(wheekuk@tiger.korea.ac.kr)

이병주 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부(bj@hanyang.ac.kr)

조사한다.

II. 4절 메커니즘의 해석

본 절에서는 미끄럼이 발생하지 않는 경우에 있어서 그림 1에서 ABCD로 형성되는 4절 메커니즘의 위치해석과 일차 기구학 해석에 관하여 간략하게 논한다. 먼저 그림과 같이 각 회전 관절 변위를 각각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 라 하고 l_1, l_2 , 그리고 l_3 를 각각 링크 $\overline{AB}, \overline{BC}$, 그리고 \overline{CD} 의 길이를 나타낸다고 한다. 이때 루프 구속방정식으로부터 다음과 같은 세 개의 관계식이 존재한다.

$$l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} = x \tag{1}$$

$$l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} = y \tag{2}$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 4\pi \tag{3}$$

여기서, $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ 이고 $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$ 를 나타낸다. 이 식들로부터 임의의 관절 변위가 주어지면 나머지 관절 변위가 구해진다.

예를 들어 θ_2 에 대한 위치해석 결과식은 다음과 같다.

$$\theta_4 = \text{atan2}(y, -x) - \text{atan2}(\sqrt{y^2 - a^2 + x^2}, y - x) \tag{4}$$

여기서

$$a = \frac{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2 - (x^2 + y^2 + l_3^2)}{2l_3}, \tag{5}$$

그리고

$$\theta_1 = \text{atan2}\left\{ \frac{(l_1 + l_2 c_2)(y + l_3 s_4) - l_2 s_2(x - l_3 c_4)}{(l_1 + l_2 c_2)(x - l_3 c_4) + l_2 s_2(y + l_3 s_4)} \right\}, \tag{6}$$

$$\theta_3 = 4\pi - \theta_1 - \theta_2 - \theta_4. \tag{7}$$

한편, (1)-(3)을 시간에 관하여 미분한 후 θ_2 를 독립변수

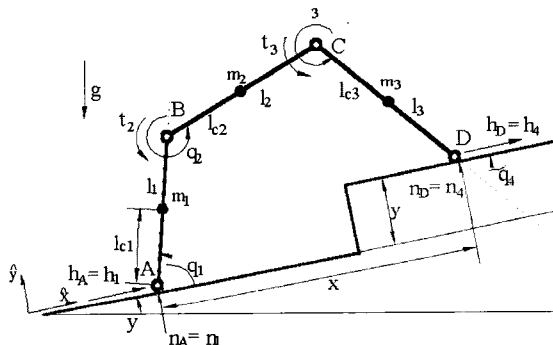


그림 1. 평면형 3 자유도 메커니즘.
Fig. 1. A planar 3 degrees of freedom mechanism.

로 가정하여 정리하면

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_2^1 \\ g_2^3 \\ g_2^4 \end{bmatrix} \theta_2 \tag{8}$$

와 같이 표현된다. 여기서

$$g_2^1 = \frac{l_2 s_3}{x c_4 + y s_4} \tag{9}$$

$$g_2^3 = \frac{y(l_2 c_{12} + l_3 c_4) - x(l_2 s_{12} - l_3 s_4)}{-x l_3 s_4 - y l_3 c_4} \tag{10}$$

$$g_2^4 = -(1 + g_2^1 + g_2^3) \tag{11}$$

이다.

III. 4절 메커니즘의 반력에 대한 해석

본 절에서는 그림 1에서의 4절 메커니즘이 두 번째와 세 번째 관절에 회전구동관절을 가지고 있을 때 정적평형상태에 있기 위해 요구되는 토크 관계식과 메커니즘이 이러한 정적 평형상태에 있을 때 발생하는 지면과의 반력을 구한다. 먼저 좌표($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$)가 지면에 고정된 기준 좌표계를 나타낸다고 하자. 그리고 점 A에서의 수직 반력과 수평 반력을 구하기 위하여 각각 x축과 y축 방향으로 가상 미끄럼 관절이 존재한다고 가정한다. 또한, 점 A에서 지면과 점 접촉을 가진다고 가정하고 이 점에서 z축 방향으로 또 하나의 가상 회전관절이 존재한다고 가정한다. 이때, 기준 좌표계의 원점으로부터 점 D까지는 두 개의 미끄럼 관절과 세 개의 회전관절을 가지는 직렬구조의 메커니즘을 나타낸다. 한편 점 D를 이 직렬 메커니즘의 출력점이라고 할 때 이 점의 변위는 x_D 와 y_D , 그리고 θ_4 로 표현된다. 그러므로, 입력 변위 벡터 θ 와 출력 변위 벡터 u 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = [d_1 \ d_2 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \tag{12}$$

$$u = [x_D \ y_D \ \theta_4]^T \tag{13}$$

이때 이들 변수벡터사이의 속도 관계식은 다음과 같이 표현되며

$$\dot{u} = [G_d^u] \dot{\theta} \tag{14}$$

여기서

$$[G_d^u] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y & -(l_2 s_{12} + l_3 s_{123}) & -l_3 c_{123} \\ 0 & 1 & x & l_2 c_{12} + l_3 c_{123} & l_3 s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

이다.

구동관절토크와 출력 사이의 관계는 (14)와 가상 일의 정리를 이용함으로써

$$\tau_b = -[G_\theta^b]^T f_b \quad (16)$$

로 구해진다. 여기서 τ_b 와 f_b 는 메커니즘의 중력을 무시하고 두 관절에서의 구동력과 이로 인하여 발생하는 반력으로 구성되는 벡터이다. 이들은 각각 (12)의 입력 변위 벡터에 해당된 입력토크와 (13)의 출력 변위 벡터에 해당된 출력토크를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_b = [h_{Ab} \ n_{Ab} \ \tau_{1b} \ \tau_{2b} \ \tau_{3b}]^T \quad (17)$$

$$f_b = [h_{Db} \ n_{Db} \ \tau_{4b}]^T \quad (18)$$

한편, 메커니즘이 점 A와 점 D에서 지면과 점 접촉을 가진다고 가정하면 다음과 같은 두 개의 조건이 주어짐을 알 수 있다.

$$\tau_1 = 0, \quad (19)$$

$$\tau_4 = 0. \quad (20)$$

(16)에 (19)와 (20)을 대입함으로써 다음과 같이 반력이 구해진다:

$$h_{Db} = \frac{\tau_2}{(l_2 s_{12} - l_3 s_{34}) - \frac{y}{x}(l_2 c_{12} + l_3 c_{34})}, \quad (21)$$

$$n_{Db} = \frac{y}{x} h_{Db}, \quad (22)$$

$$h_{Ab} = -h_{Db}, \quad (23)$$

$$n_{Ab} = -n_{Db}. \quad (24)$$

(22)로부터 지면의 마찰계수 μ 가 x/y 보다 적거나 같은 경우는 항상 미끄러짐이 점 A와 D에서 발생된다는 사실을 확인할 수 있다. 그리고 4절 메커니즘이 평형상태를 유지하기 위하여 필요 되는 구동관절 토크 τ_2 와 τ_3 의 관계는 θ_2 와 θ_3 사이의 미분관계식 (10)과 가상 일의 정리로부터

$$\tau_3 = -\frac{\tau_2}{g_2^2} \quad (25)$$

로 표현되는데 이 관계식은 (16)에 이미 내포되어 있으므로 고려할 필요가 없으며 이러한 사실을 위 식에서 확인할 수 있다.

한편, 링크 \overline{AB} , \overline{BC} , 그리고 \overline{CD} 의 질량중심이 각각 l_{c1} , l_{c2} , 그리고 l_{c3} 의 위치한다고 가정한다. 한편, 이들 질량중심의 변수벡터를 각각 c_1 , c_2 , 그리고 c_3 로 표현한다. 여기서 c_i 는 각각 링크 i 의 질량중심의 위치 x_{ci} , y_{ci} 와 링크 i 의 절대화전각 ϕ_i 로 구성된다. 이때 이들 출력변수와 입력 관절 변수 사이의 일차 미분관계식은 각각 다음과 같이 표현되며

$$\dot{c}_i = [G_\theta^{c_i}] \dot{\theta}, \quad (i=1,2,3) \quad (26)$$

여기서

$$[G_\theta^{c_1}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_{c1}s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & l_{c1}c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$[G_\theta^{c_2}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_1s_1 - l_2s_{12} & -l_2s_{12} & 0 \\ 0 & 1 & l_1c_1 + l_2c_{12} & l_2c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$$[G_\theta^{c_3}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(l_1s_1 + l_2s_{12} - l_3s_4) & -l_2s_{12} + l_3s_4 & l_3s_4 \\ 0 & 1 & l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_4 & l_2c_{12} + l_3c_4 & l_3c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

이다.

링크 \overline{AB} , \overline{BC} , 그리고 \overline{CD} 의 질량이 각각 m_1 , m_2 , 그리고 m_3 라고 할 때 이들 중량과 평형을 이루기 위해 필요한 각 입력관절에서 토크벡터 τ_{gc} 는 (26)과 (27)-(29) 그리고 가상 일의 정리로부터 다음과 같이 구해진다:

$$\tau_{gc} = -\sum_{i=1}^3 [G_\theta^{c_i}]^T \begin{bmatrix} 0 \\ -m_i g \end{bmatrix}. \quad (30)$$

중력만을 고려한 4절 메커니즘의 입력과 출력 사이의 관계는 (14)와 (30), 그리고 가상 일의 정리로부터

$$\tau_g = \tau_{gc} - [G_\theta^g]^T f_g \quad (31)$$

로 표현된다. 여기서 τ_g 와 f_g 는 각각 중력으로 인해 발생하는 입력관절토크와 반력을 나타낸다. 그러므로, 평형을 이루는 내력토크와 중력을 고려한 4절 메커니즘의 입력과 출력 사이의 관계는 (16)과 (31)로부터

$$\tau = \tau_b + \tau_g = \tau_{gc} - [G_\theta^g]^T (f_b + f_g) = \tau_{gc} - [G_\theta^g]^T f \quad (32)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 τ 와 f 는 식 (32)에서와 같이 평형을 이루는 4절 메커니즘의 총 구동입력토크와 중력으로 인해 발생된 반력으로 구성된다. 구체적으로 이들은 각각 (12)의 입력 변위 벡터에 해당된 입력토크와 (13)의 출력 변위 벡터에 해당된 출력토크를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = [h_A \ n_A \ \tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T \quad (33)$$

$$f = [h_D \ n_D \ \tau_4]^T. \quad (34)$$

메커니즘의 각 링크길이가 모두 단위 값을 가지며 질량 중심이 각 링크의 중앙 점에 위치한다고 가정할 때, 점 A에서의 반력 h_A, n_A 와 점 D에서의 반력 h_D, n_D , 그리고 τ_3 는 (32)로부터 τ_2 의 함수로서 다음과 같이 구해진다.

$$h_D = \frac{\tau_2 + b - a + \frac{a}{x} l_1 c_1}{\frac{y}{x} l_1 c_1 - l_1 s_1}, \quad (35)$$

$$n_D = \frac{y h_D - a}{x}, \quad (36)$$

$$h_A = -h_D, \quad (37)$$

$$n_A = (m_1 + m_2 + m_3)g - n_D. \quad (38)$$

여기서,

$$a = -l_{c1} c_1 m_1 g - (l_1 c_1 + l_{c2} c_{12}) m_2 g - (l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_{c3} c_{123}) m_3 g, \quad (39)$$

$$b = -l_{c2} c_{12} m_2 g - (l_2 c_{12} + l_{c3} c_{123}) m_3 g \quad (40)$$

이다. (36)으로부터 y 가 0인 경우는 수직 반력의 크기는 구동입력토크의 함수로서 표현되지 않으며 오직 중력에 의한 함수로서 표현되며, y 가 0이 아닌 경우는 입력토크의 크기를 변화함에 따라 접촉점에서의 수직 반력의 크기를 변화할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나, (38)에서와 같이 항상 수직 반력의 합은 전체중력과 동일하다는 사실을 알 수 있다.

또한, (35)에서 구동입력토크 τ_2 의 크기를 임의로 변화할 때 (16)과 (31)을 동시에 만족하도록(또는 (32)를 만족하도록) τ_3 의 크기가 결정되며 다음과 같이 표현된다:

$$\tau_3 = l_{c3} c_{123} m_3 g - l_3 s_4 h_D - l_3 c_4 n_D. \quad (41)$$

구체적으로, 중력보완을 위해 각 구동관절의 토크를 원하는 크기로 분배하고자 하는 경우에는 (31)을 이용하여 먼저 이에 대한 구동관절토크를 분배한 후 (16)을 이용하여 평형토크를 구한다. 이 결과들을 가지고 (32)와 같이 그 합을 구함으로서 필요한 각 구동관절의 토크와 이들에 대한 반력 토크를 구할 수 있다.

한편, 수평면과 ϕ 각을 이루는 경사면을 따라 포복하는 경우에는 τ_b 는 (16)과 같고 τ_{gc} 는 다음과 같이 구해지며

$$\tau_{gc} = - \sum_{i=1}^3 [G_{\theta}^{c_i}]^T [Rot(z, \phi)]^T \begin{bmatrix} 0 \\ -m_i g \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (42)$$

이 식을 (32)에 적용한 후 앞에서와 유사한 방법으로 반력을 구할 수 있다. (42)에서 $[Rot(z, \phi)]$ 는 z 축에 대한 회전행렬을 나타낸다.

IV. 미끄럼 발생조건과 걸음제어

먼저, 메커니즘은 항상 지면에 부착되므로 점 A와 점 D에서의 수직 반발력 n_A 와 n_D 는 항상 양수이어야 한다는 것을 알 수 있다. 점 A에서 미끄러짐은 메커니즘의 안쪽 방향과 바깥쪽 방향으로 발생될 수 있으나 4절 메커니즘이 안쪽 방향으로 즉, \hat{x} 방향으로 미끄러짐이 발생하는 조건과 점 D에서는 바깥쪽 방향으로 즉, \hat{x} 방향으로 미끄러짐이 발생하는 조건에 대하여 조사한다. 이러한 경우, 메커니즘이 \hat{x} 방향으로 포복하는 경우 먼저 점 A에서 미끄러짐이 발생되어 점 A가 앞으로 나아간 후 점 D에서 미끄러짐이 발생되어 점 D가 앞으로 나아감으로서 지속적인 포복을 하는 경우를 고려할 수 있다. 반대로, 이러한 메커니즘이 후진하는 경우는 먼저 점 A에서는 메커니즘의 바깥쪽 방향으로 그리고 점 D에서는 안쪽 방향으로 미끄러짐이 발생하는 경우를 고려하면 된다.

점 A에서만 안쪽으로 그리고 점 D에서만 바깥쪽으로 미끄러짐이 발생하는 조건은 각각

$$h_A \geq \mu n_A, \text{ and } |h_D| < \mu n_D \quad (43)$$

$$h_D \geq \mu n_D, \text{ and } |h_A| < \mu n_A \quad (44)$$

로 표현된다. 특히, 점 A와 C에 브레이크 기능을 가지는 바퀴를 부착하는 경우에는 브레이크가 풀어진 접촉점에서 수평 반력이 0이 되며 미끄러짐이 발생하는 것으로 고려하면 된다.

한편, 메커니즘의 양 접촉면에서 미끄러짐이 동시에 발생하는 메커니즘의 형상에서는 포복이 가능하지 않게 된다. 따라서, 이러한 포복의 순간에는 메커니즘이 정지하고 이러한 형상으로부터 벗어나야만 한다. 실제적인 한 예로서, Fig. 1에서 4절 메커니즘의 질량분포가 균일하다는 가정 하에 이 메커니즘이 대칭형상을 가질 때 이와 같은 현상이 발생된다. 이러한 경우는 메커니즘과 지면과의 양 접촉면에서 미끄러짐이 발생되지 않도록 하는 토크를 구동입력관절에 가하여 포복이 가능한 형상으로 변화한 후 이동을 지속할 수 있다. 그러므로, 이러한 메커니즘의 형상으로 인한 감속 영향을 최소화하기 위하여 포복이 진행되는 동안 반드시 이러한 현상이 발생하는 경우에는 적절한 순간에 발생하도록 포복형상의 주기를 결정할 필요가 있다.

마지막으로, 본 논문에서와 같이 메커니즘의 정적평형과 이로 인한 마찰을 이용하여 포복을 수행할 때, 항상 정적 평형 상태에 있는 메커니즘의 안정성이 고려되어야 한다. 실제로, 평형상태에 있는 메커니즘의 내력에 의하여 상반강성(antagonistic stiffness)이 발생되며 이 상반강성은 메커니즘의 형상에 따라 양수 또는 음수의 값을 가지므로 이에 관한 세심한 주의가 요구된다[9]. 그러나, 이러한 상반강성의 크

기는 매우 미약하므로 구동관절에 다음과 같은 제어방식을 사용함으로써 상쇄될 수 있다.

$$\tau_{2c} = \tau_{2avg} + k_2(\theta_{2o} - \theta_2) \quad (45)$$

$$\tau_{3c} = \tau_{3avg} + k_3(\theta_{3o} - \theta_3) \quad (46)$$

위 식에서 τ_{2avg} 와 τ_{3avg} 그리고 τ_{2c} 와 τ_{3c} 는 각각 4절 메커니즘이 정적평형상태에서 주어진 포복 궤적을 따라 한쪽방향으로의 미끄러짐을 유발하기 위해 필요 되는 평균토크와 구동관절에의 제어출력토크를 나타내며 k_2 와 k_3 는 각각 위치 게인, θ_{2o} 와 θ_{3o} 그리고 θ_2 와 θ_3 는 각각 관절 B와 C의 기준 변위 입력과 측정된 관절 변위를 나타낸다. (45)와 (46)의 제어규칙에서 오른쪽에서 두 번째 항의 경우는 주어진 기준 위치입력에 대한 오차를 제어하는 구조로 되어 있다. 따라서, 이러한 제어 규칙의 경우 위치 오차로 인한 제어입력을 포함한 제반 외란으로 인한 영향이 최대토크와 최소토크의 차의 반 이내로 제한되는 경우에 대해서는 메커니즘의 포복이 성공적으로 이루어 질 수 있다는 것을 알 수 있다.

V. 포복 운동에 필요한 구동토크에 관한 시뮬레이션

본 절에서는 앞 절에서 논의된 궤음새를 사용한다고 가

정하고 이에 적절한 점 A와 점 D에서의 미끄러짐이 발생되기 위해 요구되는 각 구동관절에서의 토크범위에 대하여 조사한다. (43)-(44)로부터 메커니즘의 지면과의 접촉점에서의 미끄러짐은 지면의 형상과 마찰계수, 그리고 메커니즘의 형상과 중량분포의 함수이며 따라서 메커니즘의 정적평형을 위해 구동관절에 주어지는 구동토크 크기의 함수임을 알 수 있다. 그러므로, x 와 θ_2 로 표현되는 메커니즘의 형상에서 정적평형을 유지하면서 접촉점 A에서는 미끄러짐이 발생하지 않고 접촉점 D에서만 미끄러짐을 발생시키는 데 필요한 최소토크(τ_{2min})와 최대토크(τ_{2max}), 이들의 평균값(τ_{2avg}), 그리고 이들의 차이 값($\Delta\tau_2 = \tau_{2max} - \tau_{2min}$)에 관해 조사하였으며 그림 2(a)-(d)는 y 가 0이고 마찰계수 μ 가 0.5 일 때에 네 가지 값 각각에 해당하는 등고선 그림들을 나타낸다. 그리고 그림 3(a)-(d)는 앞에서와 같은 조건 하에서 접촉점 D에서는 미끄러짐이 발생하지 않고 접촉점 A에서만 미끄러짐이 발생하는데 필요한 최소토크와 최대토크의 크기, 이들의 평균값, 그리고 이들의 차이 값을 각각 나타내는 등고선 그림이다. 그림 2에서 최소토크는 점 D에서 미끄러짐이 발생하려는 임계상태에서의 필요한 토크를 나타내며 최대토크는 점 D에서 미끄러짐이 발생함은 물론 점 A에서도 미끄러짐이 발생하려는 임계상황에서의 필요한 토크를 나타낸다. 그림 3에서의 최대 토크와 최소 토크도 이와 동일한 방

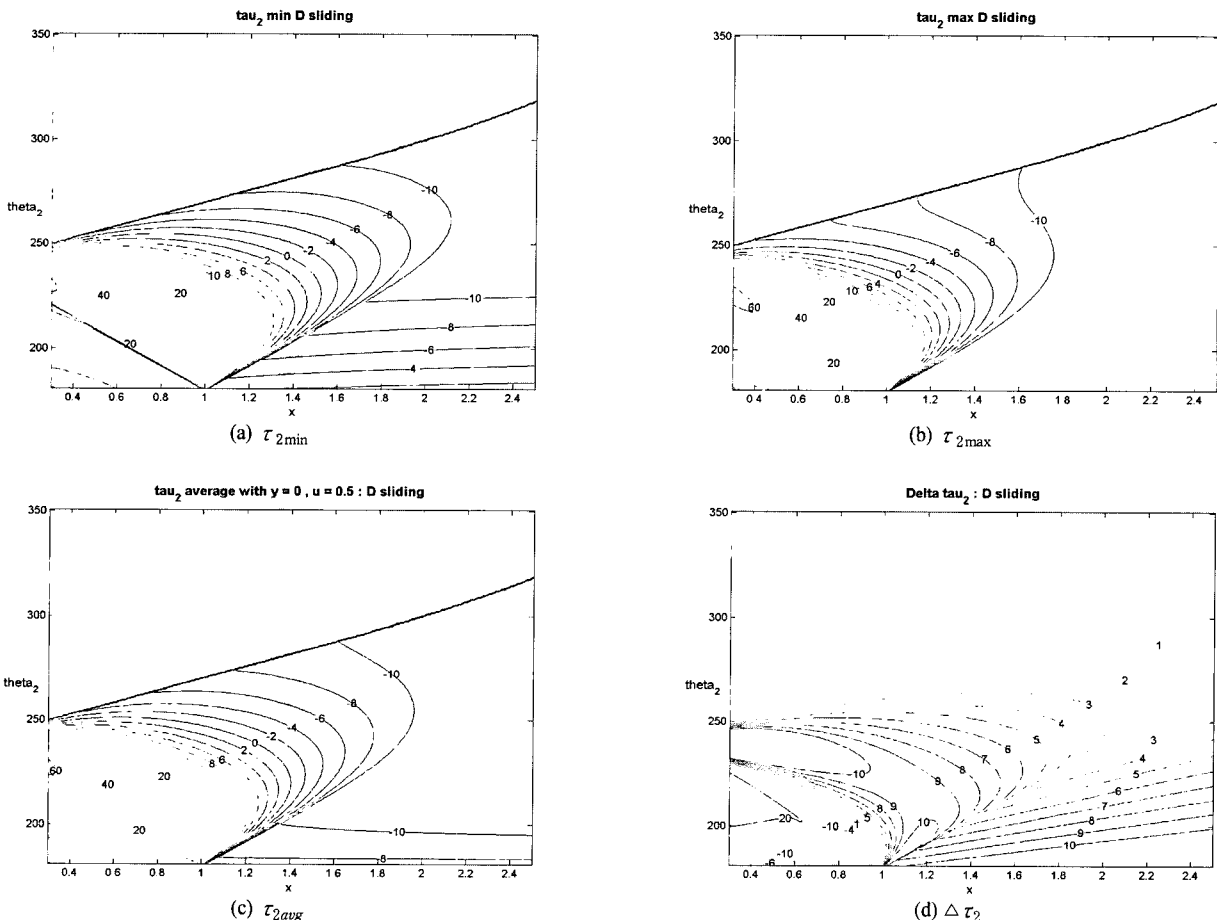


그림 2. $\mu=0.5$ 와 $y=0$ 일 때 점 D가 미끄러지기 위해 필요한 구동입력토크.
Fig. 2. Torque input required to generate a sliding at point D when $\mu=0.5$ and $y=0$.

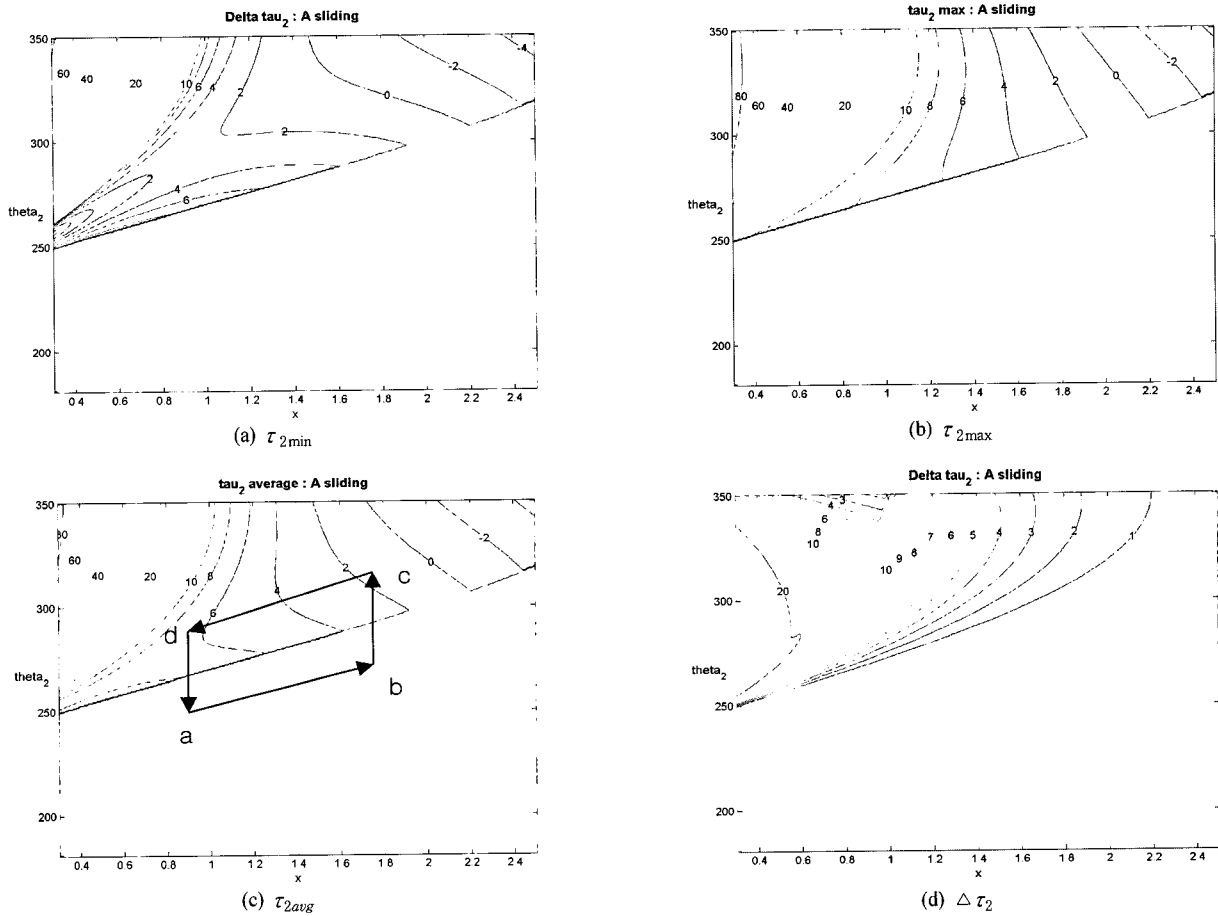


그림 3. $\mu=0.5, y=0$ 일 때 점 A가 미끄러지기 위해 필요한 구동입력토크.
 Fig. 3. Torque input required to generate a sliding at point A when $\mu=0.5$ and $y=0$.

식으로 구해졌다. 그리고 그림 2에서 등고선이 나타나지 않은 윗 부분은 점 A에서 미끄러짐이 발생하는 영역을 나타내며 그림 3에서 등고선이 나타나지 않는 아랫부분은 점 D에서 미끄러짐이 발생하는 영역을 나타낸다. 따라서, 그림 2와 그림 3에서의 경계선 부분은 미끄러짐이 점 A와 점 D에서 동시에 발생하는 경우에 대한 토크를 나타낸다.

이러한 그림 2와 그림 3의 결과를 바탕으로 4절 메커니즘의 포복을 설정할 수 있으며, 특히 그림 2(c)와 그림 3(c)로부터 설정된 궤적을 따라 요구되는 토크의 크기를 알 수 있으며 그림 2(d)와 그림 3(d)로부터 각 형상에서 어느 정도의 토크 외란에 대해 강인한가에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그림 3(c)에 표기된 궤적은 임의로 설정된 메커니즘의 한 포복 주기를 나타낸다. 그리고, 그림 4(a)-(d)는 그림 3(c)에서와 같이 설정된 포복의 한 주기동안에 메커니즘의 형상을 나타낸다. 그림 4(a)는 초기 형상을 나타내고 이때부터 점 D에서 미끄러짐이 발생하여 그림 4(b)의 형상으로 전진한다. 이 형상에 도달되면 정지상태에서 메커니즘의 형상만을 변화하여 그림 4(c)의 형상으로 바꾼 뒤 점 A에서의 미끄러짐을 유발하여 그림 4(d)의 형상으로 점 A를 전진시킨다. 그리고 다시 정지상태에서 초기상태의 형상으로 전환한다. 실제로 이러한 4절 메커니즘 포복 로봇의 포복 궤적의 설정은 원하는 특성에 따라 최적궤적을 구할 수 있으며 한 예로 토크입력의 노움과 외란에 대한 특성을 최적화하는 경우를 들 수 있겠다.

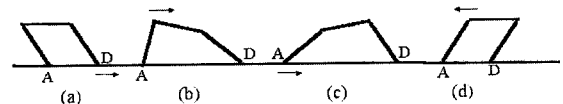


그림 4. 한 포복주기동안의 메커니즘의 형상.
 Fig. 4. Mechanism configuration during one crawling period.

VI. 결론

그림 1과 같이 진행방향과 지면에 수직인 방향이 이루는 평면에서 운동하는 4절 메커니즘의 두 번째와 세 번째 관절을 구동 관절로 이용하여 메커니즘이 정적평형을 이루도록 할 때, 지면과 접촉점에서 발생하는 반력은 구동토크 그리고 메커니즘의 질량분포와 형상에 따라 변화한다. 그리고 이러한 반력의 크기에 따라 최대 정지 마찰력의 크기가 변화하므로 미끄러짐이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 미끄러짐을 이용하는 4절 메커니즘의 포복에 관련된 해석을 수행하였다. 4절 메커니즘의 반력을 구하기 위하여 가상 구동관절을 가정함으로써 일반 직렬형 매니퓰레이터에 적용되는 기구학 모델링 방법을 사용하였다. 이러한 방법은 가상 일의 정리를 활용하는 방법으로서 부정적 메커니즘이 아닌 4절 이상의 다관절 메커니즘으로 형성되는 이동 매니퓰레이터의 해석에도 활용될 수 있다.

한편, 4절 메커니즘이 지면과 접촉을 갖는 점에서의 미끄러짐이 발생하는 조건과 4절 메커니즘의 포복 걸음새가 간

략하게 기술되고 이에 적합한 제어방식을 제시하였다. 그리고 4절 메커니즘의 다양한 형상에 대해서 각각 접촉점 A에서만 또는 D에서만 미끄러짐을 유발하기 위해 요구되는 구동관절의 최소토크와 최대토크를 시뮬레이션을 통하여 조사하였다.

이러한 4절 메커니즘을 이용한 준정적 포복 시스템은 뱀과 같은 형태의 다 자유도 링크 모듈로서 구성되는 이동로봇의 가장 단순한 형태이지만 본 논문에서 사용된 해석방법과 얻어진 결과는 이러한 다 자유도 이동로봇 시스템의 해석에 유익하게 활용될 수 있으리라 사료된다. 향후 연구과제로는 외란이나 모델 오차 등이 있는 경우 본 논문에서 제시된 4절 메커니즘의 구조를 가진 준정적 포복 시스템을 구현하고 제시된 제어규칙을 적용하여 이러한 포복 알고리즘의 안정성의 정도에 관한 확인과 동적 모델을 포함한 동적 보행에 관한 연구 그리고 4절 이상의 다 관절 메커니즘의 포복에 관한 연구가 있으며 현재 이에 관한 연구가 진행 중에 있다.

참고문헌

[1] T. T. Lee, and C. L. Shih, "A study of the gait control of a quadruped walking vehicle," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no. 2, pp. 61-69, 1986.
 [2] B. S. Lin, and S. M. Song, "Dynamic modeling, stability and

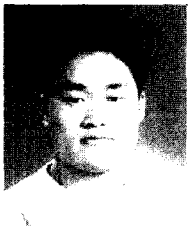
energy efficiency of a quadrupedal walking machine," *Proc. of IEEE R & A Conf.*, pp. 367-373, 1993.
 [3] J. Furusho, and A. Sano, "sensor-based control of a nine-link biped," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 83-98, 1990.
 [4] J. Furusho, A. Sano, M. Sakaguchi, and E. Koizumi, "Realization of bounce gait in a quadruped robot with articular-joint-type legs," *Proc. of IEEE R&A conf.*, pp. 697-702, 1995.
 [5] J. Hodgins, J. Koechling, and M. H. Raibert, "Running experiments with a planar biped," *Robotics Research* 3, ch.8. MIT press, pp. 349-355, 1984.
 [6] S. G. Chirikjian, and J. W. Burdick, "Kinematically optimal hyper-redundant manipulator configurations," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 6, pp. 781-793, Dec., 1995.
 [7] S. G. Chirikjian, and J. W. Burdick, "Kinematically optimal hyper-redundant manipulator configurations," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 6, pp. 794-806, Dec., 1995.
 [8] M. Thomas, and D. Tesar, "Dynamic modeling of serial manipulator arms," *Trans. of the ASME*, vol. 104, pp. 218-228, 1982.
 [9] 이병주, "잉여구동을 지닌 4절 기구에서의 강성효과에 대한 해석," *대한기계학회논문집*, 제18권, 제4호, pp. 846-855, 1994.



김 해 수
 현재 인천기능대학 컴퓨터기계설계과 교수. 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부 박사과정. 주요 관심분야는 wire cutting 가공, CAD design, 기구학, crawling/walking system 등임.



김 민 건
 1980년 고려대학교 기계공학과 졸업. 1986년 일본 게이오 대학교 공학박사. 1986년부터 현재까지 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부 교수. 주요 관심분야는 피로해석 및 시뮬레이션, 산성 안개 분위기 하에서의 피로파괴 등임.



임 남 식
 2001년 고려대학교 제어계측공학과 졸업. 동년 동대학 대학원 입학, 현재 제어계측공학과 석사과정중. 관심분야는 microprocessor, 기구학, 동역학, biped walking 등임.



김 희 국
 1980년 고려대학교 기계공학과 졸업. 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1985년), 동대학원 박사(1990년). 동대학 기계공학과 Post doc. 1년 (1990년). 1991년부터 현재까지 고려대학교 제어계측공학과 교수. 최근의 관심분야로는 주행로봇/보행로봇의 설계 및 기구학/동역학 분석, 병렬 메커니즘의 설계 및 기구학/동역학 분석 등임.



이 병 주
 1984년 한양대학교 기계공학과 졸업. 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1986년). 동대학원 박사(1991년). 1992년~1995년 한국기술교육대학교 제어기계공학과 조교수, 1995년~현재 한양대학교 제어계측공학과 부교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and control, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.