

4 절 메카니즘을 이용한 준정적 포복 시스템에 관한 연구

Study on Quasi-Static Crawling System using a Four Bar Mechanism

전 용 호*, 송 낙 윤*, 조 황*, 김 회 국**

* 광운대학교 제어계측공학과(Tel: 02-940-5155; Email:robot@daisy.kwangwoon.ac.kr)

** 고려대학교 제어계측공학과(Tel: 0415-60-1443; Fax: 0415-865-1820; Email:wheekuk@tiger.korea.ac.kr)

Abstract : In this work, we investigate the quasi-static crawling of the four-bar mechanism. 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. Therefore, we are able to treat the closed mechanism as a serial one. Also, sliding conditions of the mechanism in quasi-static equilibrium are examined. Lastly, the required torques for the mechanism to crawl with respect to various configurations of the mechanism but with a fixed ground friction are investigated.

Keywords : Four-bar mechanism(4절기구), Quasi-static crawling(준정적 포복)

1. 서론

일반 산업용 로봇 시스템들은 자동화 공작작업을 위해 예정된 장소에 설치되어 주어진 작업을 수행하도록 사용된다. 그러므로, 공장의 여러위치에 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 주행 로봇의 경우는 보행 로봇에 비하여 평평한 지면에서는 우수한 성능을 나타내지만, 반대로 지면이 고르지 못하거나 진흙과 같이 딱딱하지 않은 지면에서는 보행 로봇이 주행 로봇에 비하여 훨씬 우수한 성능을 나타낸다.

보행 로봇의 경우에 있어서는 보행시 정적 안정성에 따라 정적보행(static walking; crawling)과 동적보행(dynamic walking)으로 분류될 수 있는데 정적 보행은 대부분 곤충이나 네 다리를 가지고 있는 동물들이 crawling과 같은 매우 낮은 속도로 이동하는 형태에 적용되며 보행시 항상 정적으로 안정하도록 중앙 중심이 메카니즘의 지지점들을 연결하여 형성되는 concave 다각형내에 항상 존재하도록 보폭이나 속도를 조절되어야 한다.[6] 특히, 빠른 속도로 인해 관성효과가 크거나 외력이 있는 경우는 이들로 인한 유효질량중심이 고려되어야 한다.[7] 한편, 동적 보행은 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 보행 로봇의 설계와 보행기법에 관련된 연구는 주로 곤충과 동물의 구조를 고려하거나 이들의 보행형태에 많이 의존하고 있다. 예를 들면, crawling의 경우는 네 개의 다리 이상을 가지고 있는 곤충의 걷는 형태(gait)를, 그리고 보행(walking)의 경우는 사람, 캥거루, 말, 개등과 같이 두 개, 또는 네 개의 다리를 가지는 동물의 보행형태에 관한 연구가 진행되고 있다.[3-5]

이 밖에도 곤충이나 동물의 경우를 살펴보면 crawling이나 walking 이외에도 pacing, trotting, galloping, running, hopping, bouncing 등과 같은 여러 형태의 걷는 방식들이 있으며 이들에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.[4]

이 밖에도 수 많은 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 관절 링크모듈의 개발과 이들로 구성된 뱀과 같은 형태의 이동 기능을 가지는 다자유도 로봇시스템에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며 한 예로서 이들 링크모듈의 변형을 조절하여 이동하는 로봇에 관한

연구결과가 소개되고 있다.[1,2]

그러므로, 본 연구에서도 이러한 뱀과 같은 형태의 다자유도 링크모듈로 구성되는 이동 로봇의 단순한 형태로서 Fig. 1과 같이 진행방향과 지면에 수직한 방향이 이루는 평면에서 운동하는 4절 메카니즘의 crawling에 관하여 조사한다. 그러나, 기존의 걸음새 이동기법과는 달리 4절 메카니즘에 있어서 두 개의 구동관절을 이용하여 메카니즘이 정적평형을 이루도록 하고 지면과 메카니즘과의 접촉점에서의 반력크기를 조절함으로써 진행 방향으로의 미끄러짐을 유발하여 이동하는 준정적평형상태의 crawling방법을 사용한다.

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

2. 4 절 메카니즘의 해석

본 절에서는 미끄러짐이 발생하지 않는 경우에 있어서 Fig. 1에서 ABCD로 형성되는 4절 메카니즘의 위치해석과 일차 기구학 해석에 관하여 간략하게 논한다. 먼저 그림과 같이 각 회전관절 변위를 각각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 라고 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.

$$l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} = x \quad (1)$$

$$l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} = y \quad (2)$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 4\pi \quad (3)$$

여기서 $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 이고 $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 를 나타낸다. 이 식들로부터 임의의 관절변위가 주어지면 나머지 관절변위가 구해진다.

예를 들어 θ_2 에 대한 위치해석 결과식은 다음과 같다.

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

여기서

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

그리고

$$\theta_1 = \text{atan2} \left\{ \begin{array}{l} (l_1 + l_2 c_2)(y + l_3 s_4) - l_2 s_2 (x - l_3 c_4), \\ (l_1 + l_2 c_2)(x - l_3 c_4) + l_2 s_2 (y + l_3 s_4) \end{array} \right\}, \quad (6)$$

$$\theta_3 = 4\pi - \theta_1 - \theta_2 - \theta_4. \quad (7)$$

한편, 식(1)-(3)을 시간에 관하여 미분한 후 θ_2 를 독립변수로 가정하여 정리하면

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_2^1 \\ g_2^3 \\ g_2^4 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 \quad (8)$$

와 같이 표현된다. 여기서

$$g_2^1 = \frac{l_2 s_3}{x c_4 - y s_4} \quad (9)$$

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

$$g_2^4 = -(1 + g_2^1 + g_2^3) \quad (11)$$

이다.

3. 4 절 메카니즘의 반력에 관한 해석

본 절에서는 Fig. 1에서의 4절 메카니즘이 두 번째와 세 번째 관절에 회전구동관절을 가지고 있을 때 정적평형상태에 있기 위해 요구되는 토크 관계식과 메카니즘이 이러한 정적 평형상태에 있을 때 발생하는 지면과의 반력을 구한다. 먼저 좌표 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 가 지면에 고정된 기준좌표계를 나타낸다고 하자. 그리고 점 A에서의 수직반력과 수평반력을 구하기 위하여 각각 x 축과 y 축방향으로 가상 미끄럼 관절이 존재한다고 가정한다. 또한, 점 A에서 지면과 점 접촉을 가진다고 가정하고 이 점에서 z 축방향으로 또 하나의 가상 회전관절이 존재한다고 가정한다. 이때, 기준좌표계의 원점으로부터 점 D까지는 두 개의 미끄럼 관절과 세 개의 회전관절을 가지는 직렬구조의 메카니즘을 나타낸다. 한편 점 D를 이 직렬메카니즘의 출력점이라고 할 때 이 점의 변위는 x_D 와 y_D , 그리고 θ_4 로 표현된다. 그러므로, 입력 변위벡터 θ 와 출력변위벡터 u 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = [d_1 \ d_2 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (12)$$

$$u = [x_D \ y_D \ \theta_4]^T \quad (13)$$

이 때 이들 변수벡터사이의 속도 관계식은 다음과 같이 표현되며

$$\dot{u} = [G_\theta^u] \dot{\theta} \quad (14)$$

여기서

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

이다.

구동관절토크와 출력사이의 관계는 식 (14)와 가상 일의 정리를 이용함으로써

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

로 구해진다. 여기서 τ_b 와 f_b 는 메카니즘의 중력을 무시하고 두 관절에서의 구동력과 이로 인하여 발생하는 반력으로 구성되는 벡터이다. 이들은 각각 식 (12)의 입력변위벡터에 해당된 입력토크와 식 (13)의 출력변위벡터에 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, 메카니즘이 점 A와 점 D에서 지면과 점 접촉을 가진다고 가정하면 다음과 같은 두 개의 조건이 주어짐을 알 수 있다.

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

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

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

$$h_{Db} = \frac{\tau_2}{(l_2 s_{12} - l_3 s_4) - \frac{y}{x}(l_2 c_{12} + l_3 c_4)} \quad (21)$$

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

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

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

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

$$\tau_3 = -\frac{\tau_2}{g_2^3} \quad (25)$$

로 표현되는 데 이 관계식은 식 (16)에 이미 내포되어 있으므로 고려할 필요가 없으며 이러한 사실을 위식에서 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_{c_i} , y_{c_i} 와 링크 i 의 절대회전각 ϕ_i 로 구성된다. 이때 이들 출력변수와 입력 관절변수사이의 일차 미분관계식은 각각 다음과 같이 표현되며

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

여기서

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

$$[G_\theta^{c_2}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} & 0 \\ 0 & 1 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$[G_\theta^{c_3}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(l_1 s_1 + l_2 s_{12} - l_3 s_4) & -l_2 s_{12} + l_3 s_4 & l_3 s_4 \\ 0 & 1 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_4 & l_2 c_{12} + l_3 c_4 & l_3 c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

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 식 (26)과 (27)-(29) 그리고 가상 일의 정리로부터 다음과 같이 구해진다.

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

중력만을 고려한 4절 메카니즘의 입력과 출력사이의 관계는 식 (14)와 (30), 그리고 가상일의 정리로부터

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

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

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

로 표현될 수 있다. 여기서 τ 와 f 는 식 (32)에서와 같이 평형을 이루는 4절 메카니즘의 총 구동입력토크와 중력으로 인해 발생한 반력으로 구성된다. 구체적으로 이들은 각각 식 (12)의 입력변위벡터에 해당된 입력토크와 식 (13)의 출력변위벡터에 해당된 출력토크를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

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

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

메카니즘의 각 링크길이가 모두 단위값을 가지며 질량중심이 각 링크의 중앙점에 위치한다고 가정할 때, 점 A에서의 반력 h_A .

n_A 와 점 D에서의 반력 h_D , n_D , 그리고 τ_3 는 식 (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. 식 (36)으로부터 y 가 0인 경우는 수직반력의 크기는 구동입력토크의 함수로서 표현되지 않으며 오직 중력에 의한 함수로서 표현되며, y 가 0이 아닌 경우는 입력토크의 크기를 변화함에 따라 접촉점에서의 수직반력의 크기를 변화할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나, 식 (38)에서와 같이 항상 수직반력의 합은 전체중력과 동일하다는 사실을 알 수 있다.

또한 식 (35)에서 구동입력토크 τ_2 의 크기를 임의로 변화할 때 식 (16)과 식 (31)을 동시에 만족하도록(또는 식 (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 식 (31)을 이용하여 먼저 이에 대한 구동관절토크를 분배한 후 식 (16)을 이용하여 평형토크를 구한다. 이 결과들을 가지고 식 (32)와 같이 그 합을 구함으로써 필요한 각 구동관절의 토크와 이들에 대한 반력토크를 구할 수 있다.

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

$$\tau_{gc} = - \sum_{i=1}^3 [G_i^c]^T [Ro(\mathbf{z}, \phi)]^T \begin{bmatrix} 0 \\ -m_i g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

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

4. 미끄럼 발생조건과 걸음새제어

먼저, 메카니즘은 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 메카니즘의 안쪽 방향과 바깥쪽 방향으로 발생될 수 있으나 4 절 메카니즘이 안쪽 방향으로 즉, $\hat{\mathbf{x}}$ 방향으로 미끄러짐이 발생하는 조건과 점 D에서는 바깥쪽 방향으로 즉, $\hat{\mathbf{x}}$ 방향으로 미끄러짐이 발생하는 조건에 대하여 조사한다. 이러한 경우, 메카니즘이 $\hat{\mathbf{x}}$ 방향으로 crawling하는 경우 먼저 점 A에서 미끄러짐이 발생되어 점 A가 앞으로 나아가면 점 D에서 미끄러짐이 발생되어 점 D가 앞으로 나아가므로서 지속적인 crawling을 하는 경우를 고려할 수 있다. 반대로, 이러한 메카니즘이 후진하는 경우는 먼저 점 A에서는 메카니즘의 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 수평반력이 0이 되며 미끄러짐이 발생하는 것으로 고려하면 된다.

한편, 메카니즘의 양 접촉면에서 미끄러짐이 동시에 발생하는

메카니즘의 형상에서는 crawling이 가능하지 않게 된다. 따라서, 이러한 crawling의 순간에는 메카니즘이 정지하고 이러한 형상으로부터 벗어나야만 한다. 실제적인 한 예로서, Fig. 1에서 4 절 메카니즘의 질량분포가 균일하다는 가정하에 이 메카니즘이 대칭형상을 가질 때 이와 같은 현상이 발생된다. 이러한 경우는 메카니즘과 지면과의 양 접촉면에서 미끄러짐이 발생되지 않도록 하는 토크를 구동입력관절에 가하여 crawling이 가능한 형상으로 변화한 후 이동을 지속할 수 있다. 그러므로, 이러한 메카니즘의 형상으로 인한 감속영향을 최소화하기 위하여 crawling이 진행되는 동안 반드시 이러한 현상이 발생하는 경우에는 적절한 순간에 발생하도록 crawling형상의 주기를 결정할 필요가 있다.

마지막으로, 본 논문에서와 같이 메카니즘의 정적평형과 이로 인한 마찰을 이용하여 crawling을 수행할 때, 항상 정적평형상태에 있는 메카니즘의 안정성이 고려되어야 한다. 실제로, 평형상태에 있는 메카니즘의 내력에 의하여 상반강성(antagonistic stiffness)이 발생되며 이 상반강성은 메카니즘의 형상에 따라 양수 또는 음수의 값을 가지므로 이에 관한 세심한 주의가 요구된다.[9] 그러나, 이러한 상반강성의 크기는 매우 미약하므로 구동관절에 다음과 같은 제어방식을 사용함으로써 상쇄될 수 있다.

$$\tau_{2c} = \tau_{2avg} + k_2(\theta_{20} - \theta_2) \quad (45)$$

$$\tau_{3c} = \tau_{3avg} + k_3(\theta_{30} - \theta_3) \quad (46)$$

위 식에서 τ_{2avg} 와 τ_{3avg} 그리고 τ_{2c} 와 τ_{3c} 는 각각 4절 메카니즘이 정적평형상태에서 주어진 crawling 궤적을 따라 한쪽방향으로의 미끄러짐을 유발하기 위해 필요되는 평균토크와 구동관절에의 제어출력토크를 나타내며 k_2 와 k_3 는 각각 위치계인, θ_{20} 와 θ_{30} 그리고 θ_2 와 θ_3 는 각각 관절 B와 C의 기준입력각 측정된 관절변위를 나타낸다.

5. Crawling 운동에 필요한 구동토크에 관한 시뮬레이션

본 절에서는 앞절에서 논의된 걸음새를 사용한다고 가정하고 이에 적절한 점 A와 점 D에서의 미끄러짐이 발생되기 위해 요구되는 각 구동관절에서의 토크범위에 대하여 조사한다. 식 (43)-(44)로부터 메카니즘의 지면과의 접촉점에서의 미끄러짐은 지면의 형상과 마찰계수, 그리고 메카니즘의 형상과 중량분포의 함수이며 따라서 메카니즘의 정적평형을 위해 구동관절에 주어지는 구동토크 크기의 함수임을 알 수 있다. 그러므로, x 와 θ_2 로 표현되는 메카니즘의 형상에서 정적평형을 유지하면서 접촉점 A에서는 미끄러짐이 발생하지 않고 접촉점 D에서만 미끄러짐을 발생시키는 데 필요한 최소토크(τ_{2min})와 최대토크(τ_{2max}), 그리고 이들의 평균값(τ_{2avg})에 관해 조사하였으며 Fig. 2(a)-(c)는 y 가 0이고 마찰계수 μ 가 0.5일 때에 해당하는 등고선 그림들을 나타낸다. 그리고 Fig. 3(a)-(c)는 앞에서와 같은 조건하에서 접촉점 D에서는 미끄러짐이 발생하지 않고 접촉점 A에서만 미끄러짐이 발생하는 데 필요한 최소토크와 최대토크의 크기를 나타내는 등고선 그림이다. 이 그림들에서 구동입력토크를 조절함으로써 점 A에서 또는 점 D에서 미끄러짐을 발생시키기 위한 조건이 동시에 충족되는 형상이 존재하지 않는 것을 알 수 있으며 이러한 결과로부터 현재의 메카니즘이 crawling을 수행하기 위해서는 반드시 양접촉점에서 미끄러짐이 발생하는 형상을 거쳐야 한다는 사실을 확인할 수 있다.

Fig. 3(c)에서의 궤적은 임의로 설정된 메카니즘의 한 crawling 주기를 나타낸다. 그리고, Fig. 4(a)-(d)는 Fig. 3(c)에서와 같이 설정된 crawling의 한 주기동안에 메카니즘의 형상을 나타낸다. Fig. 3(a)는 초기 형상을 나타내고 이때부터 점 D에서 미끄러짐이 발생하여 Fig. 3(b)의 형상으로 전진한다. 이 형상에 도달되면 정지상태에서 메카니즘의 형상만을 변화하여 Fig. 3(c)의 형상으로 바꾼 뒤 점 A에서의 미끄러짐을 유발하여 Fig. 4(d)의 형상으로 점 A를 전진시킨다. 그리고 다시 정지상태에서 초기상태의 형상으로 전환한다.

4절 메카니즘이 위와 같은 주어진 경로를 따라 성공적으로 crawling을 수행하기 위해서는 메카니즘에 작용된 내력으로 인하여 발생하는 상반강성효과에 따라 다소 조정되어야 하지만 식

(45)와 (46)에 제시된 제어규칙중에서 오른쪽에서 첫 번째 항은 이 그림으로부터 얻어진 최소토크와 최대토크의 중간 값(τ_{2avg})을 취하며 두 번째항의 경우는 이들 사이의 차이의 반에 해당하는 토크로 제한되어야 한다는 사실을 확인할 수 있다.

6. 결론

Fig. 1과 같이 진행방향과 지면에 수직한 방향이 이루는 평면에서 운동하는 4절 메카니즘의 두 번째와 세 번째 관절을 구동관절로 이용하여 메카니즘이 정적평형을 이루도록 할 때, 지면과 접촉점에서 발생하는 반력은 구동토크 그리고 메카니즘의 질량 분포와 형상에 따라 변화한다. 그리고 이러한 반력의 크기에 따라 최대 정지 마찰력의 크기가 변화하므로 미끄러짐이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 미끄러짐을 이용하는 4절 메카니즘의 crawling에 관련된 해석을 수행하였다. 4절 메카니즘의 반력을 구하기 위하여 가상구동관절을 가정함으로써 일반 직렬형 매니퓰레이터에 적용되는 기구학 모델링 방법을 사용하였다. 이러한 방법은 가상일의 정리를 활용하는 방법으로서 부정정 메카니즘이 아닌 4절이상의 다절 메카니즘으로 형성되는 이동 매니퓰레이터의 해석에도 활용될 수 있다.

한편, 4절 메카니즘이 지면과 접촉을 갖는 점에서의 미끄러짐이 발생하는 조건과 4절 메카니즘의 crawling 걸음새가 간략하게 기술되고 이에 적합한 제어방식을 제시하였다. 그리고 4절 메카니즘의 다양한 형상에 대해서 각각 접촉점 A에서만 또는 D에서만 미끄러짐을 유발하기 위해 요구되는 구동관절의 최소토크와 최대토크를 시뮬레이션을 통하여 조사하였다.

이러한 4절 메카니즘을 이용한 준정적 crawling 시스템은 뱀과 같은 형태의 다자유도 링크 모듈로서 구성되는 이동로봇의 가장 단순한 형태이지만 본 논문에서 사용된 해석방법과 얻어진 결과는 이러한 다자유도 이동로봇 시스템의 해석에 유익하게 활용될 수 있으리라 사료된다. 향후 연구과제로는 외란이나 모델 오차등이 있는 경우 본 논문에서 제시된 4절 메카니즘을 이용한 정적 crawling 시스템에 제시된 제어규칙을 적용하여 이러한 crawling 알고리즘의 안정성의 정도에 관한 확인과 동적보행에 관한 연구 그리고 4절이상의 다절 메카니즘의 crawling에 관한 연구가 있으며 현재 이에 관한 연구가 진행중에 있다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Thomas, and D. Tesar, "Dynamic Modeling of Serial Manipulator Arms," Trans. of the ASME, vol 104, pp. 218-228, 1982

[9] 이병주, "인여구동을 지닌 4절 기구에서의 강성효과에 대한 해석," 대한기계학회논문집, 제 18권, 제4호, pp. 846-855, 1994.

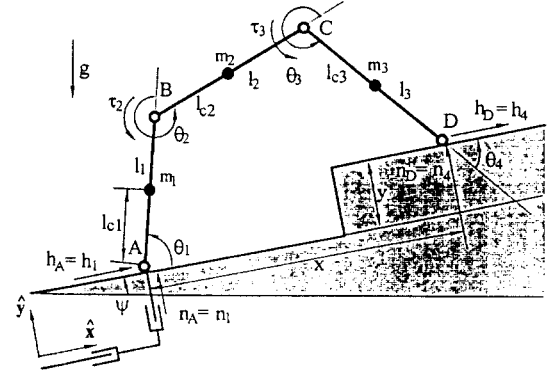


그림 1. 평면형 3 자유도 메카니즘.
Figure 1. A Planar 3 Degrees of Freedom Mechanism.

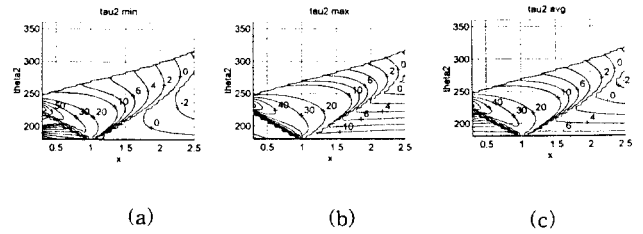


그림 2. $\mu=0.5$ 와 $y=0$ 일 때 점 D가 미끄러지기 위해 필요한 구동입력토크: a) τ_{2min} , b) τ_{2max} , c) τ_{2avg}

Figure 2. Torque input required to generate a sliding at point D when $\mu=0.5$ and $y=0$: a) τ_{2min} , b) τ_{2max} , c) τ_{2avg} .

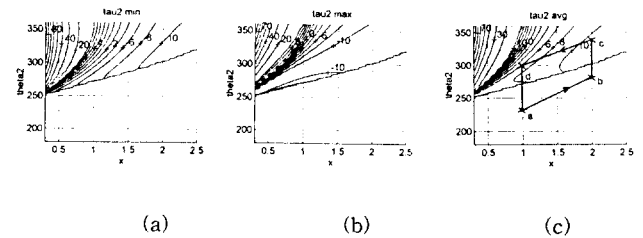


그림 3. $\mu=0.5$ 와 $y=0$ 일 때 점 A가 미끄러지기 위해 필요한 구동입력토크: a) τ_{2min} , b) τ_{2max} , c) τ_{2avg}

Figure 3. Torque input required to generate a sliding at point A when $\mu=0.5$ and $y=0$: a) τ_{2min} , b) τ_{2max} , c) τ_{2avg} .



그림 4. 한 포복주기동안의 메카니즘의 형상.
Figure 4. Mechanism configuration during one crawling period.