

자이로 효과의 피칭 모션을 고려한 한 바퀴 로봇의 모델 기반 롤링 모션 제어

Model-Based Rolling Motion Control of an One-wheeled Robot Considering the Pitching Motion of a Gyroscopic Effect

이 상 덕* · 정 슬†
(Sang-Deok Lee · Seul Jung)

Abstract – In general, a yawing motion concept is used for the lateral control of one wheel robot where the gimbal system is located horizontally. In this paper, another concept of the vertically located gimbal system is presented for the same purpose. Although the vertical concept undergoes an instability more easily than the horizontal one, the pitching motion of the gyroscopic effect is considered. Firstly, the trade-off relation between two balancing concepts are investigated by comparing the gyroscopic mechanism. Secondly, the dynamic model for the problem of the proposed concept is derived using the oscillatory inverted stick model. Thirdly, the stability of the model is analyzed using the phase trajectory method. Finally, the control performance of the system by a vibration controller is simulated.

Key Words : Balancing control, Gyroscopic effect, Single-wheel robot, The inverted stick model

1. 서 론

한 바퀴 로봇의 균형 제어를 위한 방법으로는 리액션휠(Reaction Wheel)과 제어모멘트자이로(Control Moment Gyro)가 주요 이용되어져 왔다. 리액션 휠을 이용한 밸런싱 제어는 장착된 리액션 휠의 속도를 변화시키는 방식을 사용한다. 무라타결에서는 동적 모델링을 통해 리액션 휠 기반의 균형 제어 방법이 사용되었다[1, 2]. 제어모멘트자이로 방식은 장착된 플라이휠을 일정한 속도로 고정된 상태에서 각운동량의 방향을 변화시키는 방식을 사용한다. 이 방식은 큰 힘과 빠른 모멘텀 변환을 할 수 있다는 장점을 갖고 있어 위성의 자세 제어 분야에서 많은 연구가 되어 왔다[3, 4].

제어모멘트자이로의 요잉 모션을 이용한 제어 방법은 로봇과 지면의 한 점 접지 상태에서 로봇이 지면과 수평으로 마찰을 생성하여 로봇의 좌우 균형을 제어하는 원리가 일반적으로 이용되어 왔다[5, 6]. 이 때, 로봇의 무게가 크고 로봇 바퀴의 타이어의 공기가 적을수록 큰 마찰력이 작용할 수 있고 마찰력에 의해 생성되는 힘이 로봇의 롤링 모션을 생성하여 균형을 유지하게 한다. 하지만 플라이휠을 고속으로 회전시키기 위한 많은 전력을

소비하는 단점을 갖고 있고 로봇에 있어서 배터리의 크기와 무게는 매우 큰 설계 인자가 될 수 있다.

본 논문에서는 이런 관점에서 요잉 모션이 아닌 롤링 모션의 자이로 효과를 이용한 균형 제어 방법을 제안한다. 상대적으로 작은 자이로 힘을 이용해서도 롤 방향의 모션을 변화할 수 있는 장점이 있지만 지면과의 마찰력이 상대적으로 작아지게 되므로 빠른 민첩성을 얻는 대신 안정성이 저하되는 문제를 갖게 된다[6, 7]. 안정성 문제는 최근에 에너지 저장용 플라이휠에 관한 관심이 최근 증대되면서 더욱 활발하게 연구되어지고 있다[8-10].

외력이 없는 역진자는 평형상태(Equilibrium point)를 제외하고는 완전히 불안정한 에너지 상태를 갖게 된다. 즉, 여기된 에너지를 최소화하여 안정한 상태로 회귀하려는 특성을 갖고 있기 때문에 무게 중심 방향으로 쓰러지는 특성을 갖게 된다. 이러한 특성으로 인해 제어 이론과 응용 분야에서 역진자 모델은 끊임없이 사용되어 지고 있다. 두 개의 휠을 갖는 로봇의 역진자 모델이 제안되었고, 이러한 시스템에 적응 제어를 이용한 제어 방법과 지능 제어를 이용한 방법들이 제안되었다. 이동형 한 바퀴 시스템의 경우에도, 안정도 향상 방법이 제안되었고, 그 외에도 다양한 제어 방법들이 제안되고 있다[11-16].

본 논문에서는 롤링에 의해 저전력 방식으로 운영되는 한 바퀴 로봇의 균형제어 방법을 제안한다. 피치 방향의 자이로 모션을 고려한 균형 제어를 실현하기 위해서 수직 진동하는 역 스틱 모델을 제안한다. 제어모멘트자이로 내부 플라이휠의 모멘텀의 방향 전환을 지면과 수평인 회전을 사용하며 자이로 효과가 롤과 피치 방향으로 생성이 된다. 로봇이 균일한 질량의 함으로 표현

† Corresponding Author : Dept. of Mechatronics Engineering,
Chungnam National University, Korea
E-mail : jungs@cnu.ac.kr

* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Korea

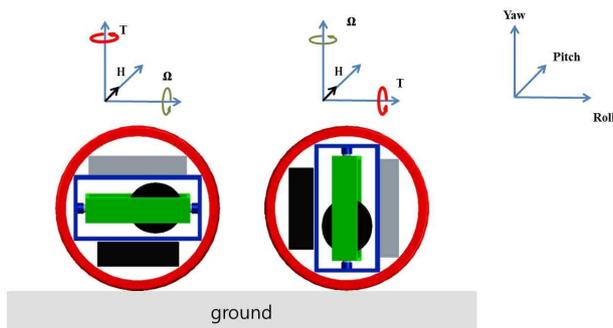
Received : May 3, 2015; Accepted : January 7, 2016

될 수 있고 좌우와 앞뒤의 무게가 균일하다는 가정 하에서 동역학 방정식을 유도한다. 유도된 동역학 방정식의 동적 특성을 위상 궤적 방법을 사용하여 분석한다[17, 18]. 발산의 특성을 억제하기 위한 진동 제어기를 제안하고 시뮬레이션을 통해서 발산에 대한 억제 효과를 확인한다.

2. 본 론

2.1 두 개념의 자이로 효과

자이로 효과의 두 가지 운영 개념은 그림 1과 같다. 그림 1(a)에서는 각운동량의 방향을 전환하는 벡터 Ω 가 롤 축을 기준으로 회전 작용하게 되며 이 경우의 자이로 효과는 요 축을 기준으로 작용하게 된다. 이러한 구조에서는 로봇의 바디 휠의 자세가 제자리에서 지면과 수평으로 회전하는 효과를 일으키게 되는데 이 때 지면과의 마찰력은 비비의 형태의 모선에 의한 마찰력으로 형성된다. 그림 1(b)에서는 Ω 가 요 방향을 축으로 형성되므로 유도되는 자이로 효과는 롤 방향으로 형성된다. 이 때 지면과의 마찰력은 그림 1(a)에 비해 매우 작아지게 된다. 그러므로, 그림 1(b)의 운영개념은 그림 1(a) 보다 상대적으로 적은 회전 모멘트의 양으로 균형제어를 할 수 있는 장점이 생기게 된다.



(a) (b)
그림 1 두 가지 운영 개념 (a). 요 운영 개념, (b). 롤 운영 개념
Fig. 1 Two operating concepts (a). Yaw operation concept, (b). Roll operation concept

실제 실험을 통해서 두 개념을 지표화 한 결과 표 1과 같았다. 개념 1은 그림 1의 (a)에 해당하고 개념 2는 그림 1의 (b)에 해당한다.

표 1 두 운영 개념에 관한 실험적인 비교
Table 1 Experimental comparison of two operating concepts

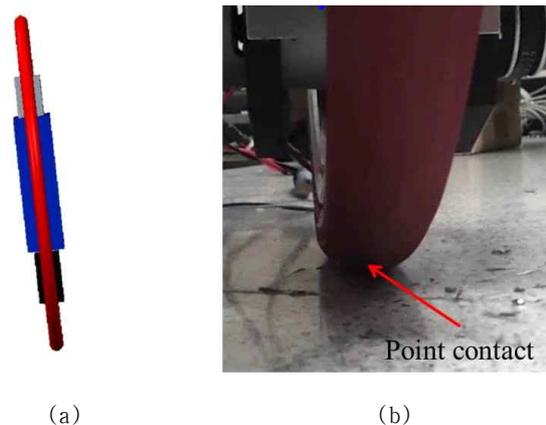
	Power consumption(Watt)	Controllable B/W(degrees)
concept 1	120(maximum)/60(normal)	-5.5~5.5
concept 2	80(maximum)/40(normal)	-2~2

자이로 효과의 영향을 보다 자세히 살펴보면 그림 1(b)에 있는 H가 바디 휠의 중심축과 서로 일치 할 경우에 이상적인 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이 경우 자이로 효과는 외부 휠의 롤 축에 정확하게 작용하게 된다. 하지만, 내부 플라이휠 베어링의 불확실성과 벨트의 백래시, 그리고 실제 제어 상태에서 항상 같은 축을 유지하는 것은 매우 어려운 일이 된다. 그러므로 실제 생성되는 자이로 효과는 롤 효과 뿐 만 아니라 피치 효과도 함께 나타나는 문제가 발생한다. 롤 방향의 자이로 효과는 제어에 필요한 힘으로 작용할 수 있고 피치 효과는 제어에 방해가 되는 힘으로 작용하게 된다. 만일 플라이휠의 중심축이 바디 중심축과 45도 이상의 편차를 갖게 될 경우에 자이로 효과는 피치 방향으로 주요하게 작용하게 되는 문제가 발생하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이, 피치에 의한 영향은 지면과의 마찰력을 고려하여 시스템에 전달이 되기 때문에 그림 1(a) 보다는 그림 1(b)에서 보다 영향이 크다고 할 수가 있다. 피치의 영향은 롤과 서로 에너지를 공유하는 형태로 작용할 수 있으므로 롤의 진동을 고려한 제어 방법이 필요하게 된다. 본 논문에서는 이들 효과들이 시스템의 안정성에 어떤 방식으로 영향을 주는지를 모델링 분석을 통해서 제시하고자 한다.

2.2 동적 모델링

제시된 로봇 시스템을 진행 방향을 기준으로 바라보면 스틱 형태를 보이게 되고 로봇의 좌우 균형 제어는 스틱 모델의 좌우 회전각을 제어하는 문제로 단순화 할 수가 있다. 그림 2에서와 같이 로봇은 진행 방향에서 로봇과 점접촉을 갖게 되고 자언력에 의해서 좌우로 쓰러지는 구조를 갖고 있다고 볼 수 있다.

이 경우를 개념 2라고 할 때 자이로 모션은 롤 모션과 피치 모션의 합으로 표현될 수 있다. 롤 모션은 모델의 좌우 회전각으로 표현 할 수 있고 피치 모션은 상하 진동 모션으로 표현할 수가 있다. 모델의 무게중심점이 피치 모션에 의해서 위 아래로 변하는 특성이 있기 때문이다. 그러므로 해당 특성들을 반영하여 간략화 된 동적 모델로 그림 3과 같은 수직 진동 특성을 지닌



(a) (b)
그림 2 모델링 특성 (a) 진행방향에서의 모습, (b) 점 접촉 특성
Fig. 2 Modeling characteristics (a) Longitudinal feature, (b) contact point property

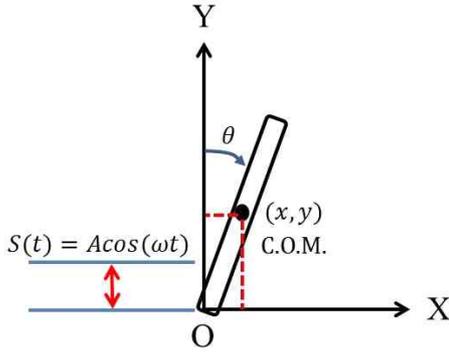


그림 3 제시된 문제에 관한 동적 모델

Fig. 3 Dynamic model for the proposed problem

스틱 모델을 제안한다. 이때, r (m)은 무게중심점까지의 길이를 나타내고, M (Kg)은 무게, g (ms⁻²)는 중력가속도를 각각 나타낸다.

무게중심점(Center of Mass)이 스틱의 중심점에 위치하고 있다고 할 때 오일러-라그랑지에 의한 지배식의 유도 과정은 다음과 같다. 무게중심점에서의 좌표는 다음과 같이 표현된다.

$$x = r \sin \theta, \quad y = r \cos \theta + A \cos \omega t \quad (1)$$

$$\dot{x} = r \dot{\theta} \cos \theta, \quad \dot{y} = -r \dot{\theta} \sin \theta - A \omega \sin \omega t \quad (2)$$

무게중심점의 속도의 제곱을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \\ &= r^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + r^2 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta \\ &\quad + 2rA\omega \dot{\theta} \sin \theta \sin \omega t + A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t \\ &= r^2 \dot{\theta}^2 + 2rA\omega \dot{\theta} \sin \theta \sin \omega t + A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

운동에너지는 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \\ &= \frac{1}{2} M r^2 \dot{\theta}^2 + M r A \omega \dot{\theta} \sin \theta \sin \omega t + \frac{1}{2} M A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} M r^2 \right) \dot{\theta}^2 \\ &= \frac{2}{3} M r^2 \dot{\theta}^2 + M r A \omega \dot{\theta} \sin \theta \sin \omega t + \frac{1}{2} M A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t \end{aligned} \quad (4)$$

위치에너지는 다음과 같다.

$$V = M g r \cos \theta - M g A \cos \omega t \quad (5)$$

라그랑지 방정식은 다음과 같다.

$$L = \frac{2}{3} M r^2 \dot{\theta}^2 + M r A \omega \dot{\theta} \sin \theta \sin \omega t + \frac{1}{2} M A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t - M g r \cos \theta - M g A \cos \omega t \quad (6)$$

라그랑지안에 의한 식은 다음과 같이 유도하게 된다.

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = M r A \omega \dot{\theta} \cos \theta \sin \omega t + M g r \sin \theta \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = \frac{4}{3} M r^2 \dot{\theta} + M r A \omega \sin \theta \sin \omega t \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = \frac{4}{3} M r^2 \ddot{\theta} + M r A \omega \dot{\theta} \cos \theta \sin \omega t + M r A \omega^2 \sin \theta \cos \omega t \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{4}{3} M r^2 \ddot{\theta} + M A r \omega^2 \sin \theta \cos \omega t - M g r \sin \theta \quad (10)$$

$$F = \frac{4}{3} M r^2 \ddot{\theta} + (-M g r + M A r \omega^2 \cos \omega t) \sin \theta \quad (11)$$

외력이 작용하지 않을 경우 (11)의 좌측 항은 영의 값을 갖게 되므로 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{\theta} + \left(-\frac{3g}{4r} + \frac{3A\omega^2}{4r} \cos \omega t \right) \sin \theta = 0 \quad (12)$$

차원이 없는 변수를 사용하여 (12)를 변수화 한다. τ 는 시간 상수 이고, ω 는 각속도를 나타내고, 그리고 ω_0 는 시스템의 고유 진동수에 해당한다.

$$\tau = \omega t, \quad \omega_0^2 = \frac{3g}{4r} \quad (13)$$

$$\omega^2 \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + (-\omega_0^2 + \frac{3A}{4r} \omega^2 \cos \tau) \sin \theta(\tau) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + \left(-\frac{\omega_0^2}{\omega^2} + \frac{3A}{4r} \cos \tau \right) \sin \theta(\tau) = 0 \quad (15)$$

$\frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1$ 이라고 하면 (16)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + (-1 + \delta \cos \tau) \sin \theta(\tau) = 0 \quad (16)$$

무게중심점까지의 길이가 0.25(m) 일 경우 $\delta = \frac{3A}{4r} = 5.4$ 가 된다.

$$\frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + (-1 + 5.4 \cos \tau) \sin \theta(\tau) = 0 \quad (17)$$

(17)에서 제시된 파라미터 A 는 바디 휠의 상하 진동의 진폭에 해당한다. 이를 플라이휠의 진동의 폭으로 나타내면 (18)과 같다. λ 는 플라이휠의 진동 폭과 바디의 진동 폭의 관계를 선형화 한 이득값에 해당하고 B 는 플라이휠의 진동 폭을 나타낸다. 이 때 플라이휠과 바디는 모두 같은 진동

주파수를 갖는다고 가정하게 되면 (18)을 반영하여 (17)은 (19)와 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda B \tag{18}$$

$$\frac{d^2\theta}{d\tau} + (-1 + 5\lambda B \cos\tau)\sin\theta(\tau) = 0 \tag{19}$$

변수 λ 는 자이로 효과를 이용한 바디 시스템과 제어모멘트 자이로의 물리적인 관계에 관한 선행된 실험 연구를 바탕으로 추정할 수가 있다[6, 7]. 해당 연구에서 바디 시스템의 속도는 제어모멘트 자이로의 속도와 플라이휠의 회전에 의한 각운동량에 해당하는 선형 관계로 추정할 수 있음을 확인 하였다. 그러므로, 본 논문에서는 λ 의 값을 다음과 같이 사용한다.

$$\lambda = 2.54 \tag{20}$$

(20)을 반영하면 (19)는 (21)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d^2\theta}{d\tau^2} + (-1 + 12.7B \cos\tau)\sin\theta(\tau) = 0 \tag{21}$$

2.3 안정성 분석

(21) 에서 플라이휠이 이상적인 상태로 피칭 모션을 생성하지 않았을 때의 시스템의 모델은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\ddot{\theta} + (-1)\sin\theta = 0 \tag{22}$$

(22)의 위상 궤적 분석을 실시하게 되면 그림 4와 같은 특성이 나타난다.

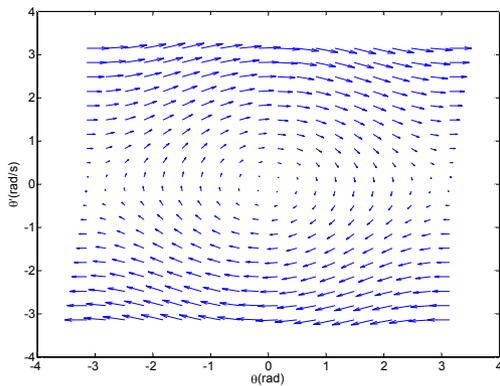


그림 4 모델의 위상 궤적 특성
Fig. 4 Phase trajectory characteristic of proposed model

그림 4에서 X축은 모델의 롤 방향 각도인 θ 를 나타내고, Y 축은 롤 방향의 각속도에 해당하는 $\dot{\theta}$ 을 나타낸다. 해당

그림은 외력이 없는 상태를 의미하므로 어떤 힘이 발생하는가에 따라서 그림에서 표시된 화살표의 방향으로 시스템의 상태가 변할 수 있다는 의미를 나타낸다. 또한 중심점에서 각도와 각속도가 변하지 않고 한 점에서 최소 원을 형성할 수가 있음을 보여준다. 중앙점으로 부터 멀어질수록 형성되는 원의 반경이 커질 수가 있으며 어떤 추가된 힘에 의해서 원의 형태가 점점 증가하거나 감소하는 특성을 보여줄 수가 있다. 궤적의 상태가 원의 형태에 가깝고 그 크기가 증가하지 않은 상태에서 시스템은 안정성을 갖고 있다고 판별할 수가 있다. 이와는 다르게 궤적의 형태가 점점 커지는 형상은 시스템이 발산하고 있음을 나타낸다.

시스템의 초기 상태가 0.5 라디안만큼 기울어져 있다고 가정할 때 (22)의 위상 궤적은 그림 5의 형태를 나타내게 된다. 그림에서 검정색 점으로 표시된 출발점은 초기 상태를 의미하고 화살표 방향으로 회전하고 있음을 보여준다. 이러한 경우 X축의 상태는 정현파와 신호의 형태를 나타내고 그 크기는 0.5 라디안의 진폭을 갖게 된다. 즉, 해당 모델이 안정한 상태에서는 단위원의 궤적을 형성하고 그 때의 X축은 정현파의 형태를 보여준다는 점을 확인할 수 있다.

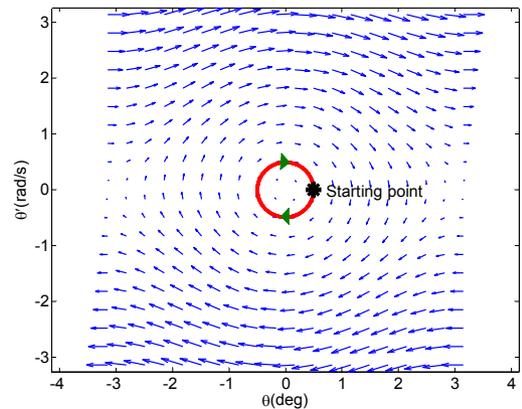


그림 5 안정 특성
Fig. 5 Stable property

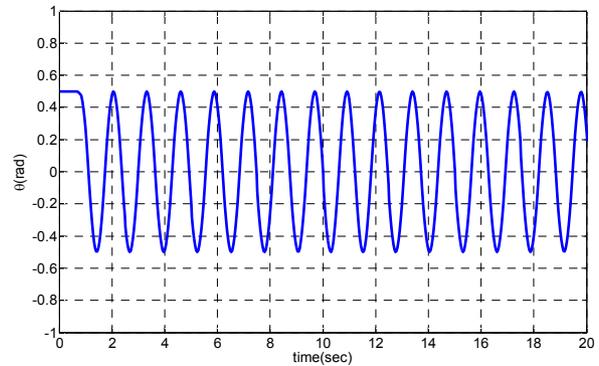


그림 6 그림 5의 X축
Fig. 6 Axis X of Fig. 5

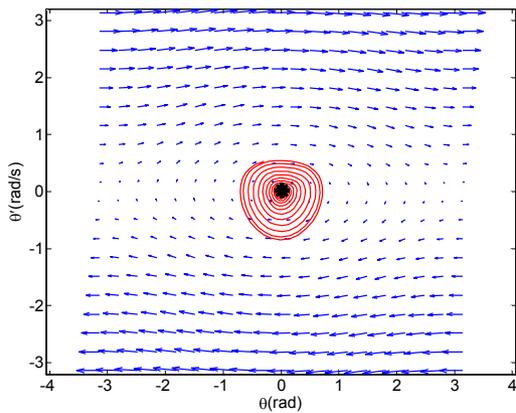


그림 7 발산
Fig. 7 Divergence

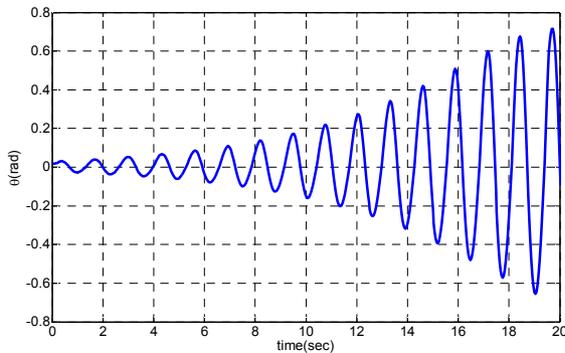


그림 8 그림 7의 X축
Fig. 8 Axis X of Fig. 7

실제 상태에서는 시스템의 초기 상태는 매우 작은 각도의 범위를 갖게 되므로 이를 고려하여 초기 상태가 1도인 조건에서 파라미터의 영향을 분석한다. 파라미터의 크기를 0부터 서서히 증가 시키면서 확인해 본 결과 파라미터의 크기가 증가할수록 시스템은 발산하는 특성을 나타냈다. 그림 7은 파라미터 B 의 크기가 50(m) 일 때의 분석 결과이고 그때의 X 축은 그림 8과 같다.

그러므로 플라이휠의 진동 폭의 크기에 따라 해당 모델의 위상 궤적은 발산할 수 있음을 분석을 통해 확인할 수가 있다. 해당 분석에서 플라이휠의 진동의 폭은 플라이휠 회전에 따른 호의 길이로 볼 수 있으므로 다음과 같이 그 각도의 변화량을 알아 볼 수가 있다.

$$0.075 \times \cos\theta \approx 0.050 \quad (23)$$

(23)에 따르면 플라이휠 호의 진동 폭은 대략적으로 45도 부근의 값을 갖고 있음을 추정할 수 있게 된다. 이러한 발산의 현상은 플라이휠 호의 진동 폭이 작아질수록 발산의 폭이 작아지게

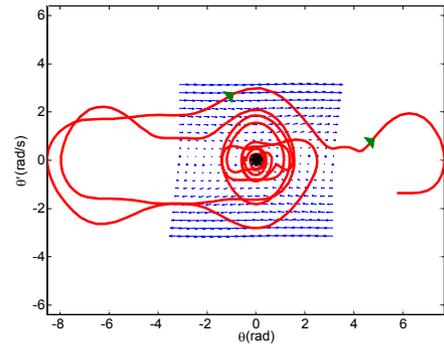


그림 9 발산 케이스 2
Fig. 9 Divergence case 2

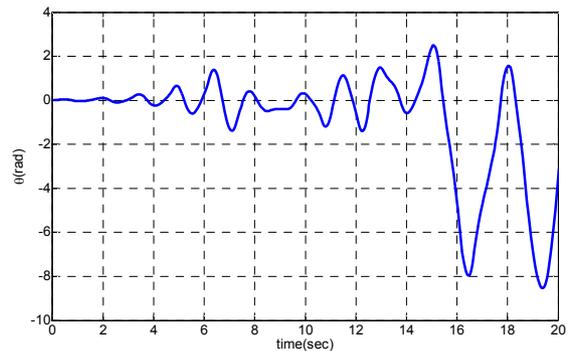


그림 10 그림 9의 X축
Fig. 10 Axis X of Fig. 9

되는 특성을 갖고 있다. 반대로, 플라이휠호의 진동 폭이 100(mm)라고 가정했을 경우 다른 유형의 발산 특성이 나타난다. 위상 궤적이 원의 형태를 벗어나서 외곽에 있는 궤적의 흐름을 따라 좌우에 있는 궤적의 상태로 이동하는 현상이 그것이다. 그림 9와 10은 그 특성들을 나타낸다.

2.4 제어기 설계

다음으로 이러한 시스템의 비안정성에 대한 제어 방법을 제안한다. 먼저 수직 방향의 진동 특성이 없을 경우에는 그림 6과 같이 이상적인 정현파 특성을 갖게 되므로 선형 제어를 활용한 제어 방법을 제안한다. 정현파 형태의 시스템 특성은 위치와 속도의 조합에 의해서 표현이 가능하게 되므로 총 4개의 상태로 간략화가 가능하다. 각도가 양수 이고 각속도가 양수인 상태, 각도가 양수이고 각속도가 음수가 되는 상태, 각도가 음수이고, 각속도가 음수인 상태, 그리고 각도가 음수이고 각속도가 양수인 상태이다. 이러한 4개의 상태가 반복적으로 유지된다는 가정 하에 제어 법칙은 각도 오차와 각속도 오차를 제거하는 형태가 가능하다. 비례미분제어기가 그러하다. (14)에서 수직 진동 성분을 제외

한 제어 법칙은 다음과 같게 된다.

$$K_p e + K_d \dot{e} = \frac{4}{3} M l^2 \ddot{\theta} + (-M g r) \sin \theta \quad (24)$$

여기서 e 는 각도 오차이고, \dot{e} 각속도 오차에 해당한다. F_h 는 수평 방향 힘을 나타낸다.

다음으로 수직 성분에 대한 제어 법칙은 다음과 같다.

$$F_v = (M A r \omega^2 \cos \omega t) \sin \theta - a \sin (\lambda \theta_f) \quad (25)$$

그러므로 전체적인 제어 법칙은 다음과 같게 된다.

$$F = F_h + F_v = K_p e + K_d \dot{e} + a \sin (\lambda \theta_f) \quad (26)$$

(26)에서 F_v 는 수직 방향의 힘에 해당한다. 균형제어의 범위는 표 1에서 언급한 바와 같이 매우 작은 대역폭을 갖고 있다. 그러므로 $\sin \theta \approx \theta$ 과 $\lambda \theta_f \approx \theta$ 가 성립한다고 가정할 수 있다. 식 (26)을 다시 쓰게 되면 (27)이 된다.

$$F = F_h + F_v = K_p (e - \alpha) + K_d \dot{e} \quad (27)$$

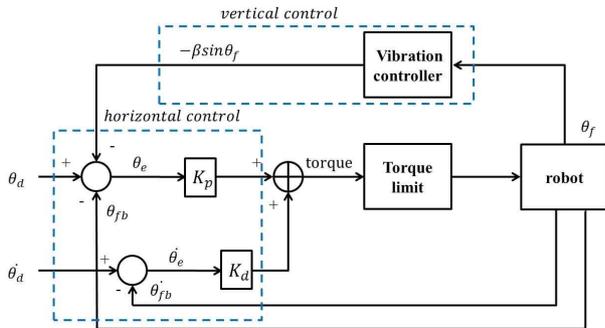


그림 11 제안하는 제어 블록도

Fig. 11 Proposed control block diagram

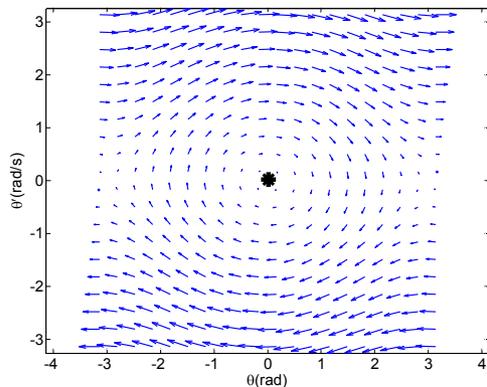


그림 12 제어 법칙 검증

Fig. 12 Verification of proposed control law

실제 시스템에서 수직 방향에 대한 직접적인 액추에이터가 없으므로 수직 방향의 제어 법칙은 시스템의 각도 θ 에 오프셋으로 작동하게 된다. 또한 α 를 선정하는 방법으로는 플라이휠의 상태를 고려할 수 있도록 다음과 같은 방법을 제안한다.

$$\alpha = \beta \sin \theta_f \quad (28)$$

여기서 β 는 계인 값이다.

그림 11은 제어블록선도이다.

그림 11에 제시된 조건에서 (27)의 제어법칙을 적용한 시뮬레이션 검증 결과는 그림 12와 같다. 이 경우 이상적인 시스템의 안정 상태가 항상 유지됨을 확인할 수가 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 한 바퀴 로봇의 균형 제어를 위한 새로운 제어 방법을 제안하였다. 제안된 한 바퀴 이동로봇에서 자이로 효과를 이용한 두 개의 제어 개념을 메커니즘의 차이를 이용하여 설명하였고 그 장단점을 비교 한 결과를 제시하였다. 새로운 개념으로 본 논문에서 제안하고 있는 롤 기반의 모션을 이용한 방법은 제어 가능한 대역폭이 상대적으로 작은 문제점을 안고 있으며 자이로 효과에 의한 피치 방향의 모션에도 상대적으로 민감하게 반응하는 특징을 지니고 있다. 이러한 비안정성의 특징을 개선하기 위해서 먼저 상하 진동을 갖는 스틱 모델을 이용하여 제시한 문제를 모델링 하였다. 모델링으로부터 유도된 동역학 방정식의 특성을 위상 궤적 방법을 이용하여 분석하였다. 분석 결과 수직 방향의 진동에 의한 영향이 시스템의 비안정성과 매우 밀접한 관련을 갖는 하나의 변수가 될 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 문제를 해결하는 방법의 하나로 플라이휠의 상태가 반영될 수 있는 수직 진동 제어가 제안되었고 시뮬레이션 분석을 통해 그 유효성을 사전 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A21 A110 49503)의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] H. Jin, J. Hwang, and J. Lee, "A balancing control strategy for a one wheel pendulum robot based on dynamic model decomposition: Simulations and experiments," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 763-768, 2011.
- [2] J. Lee, S. Han, and J. Lee, "Decoupled dynamic control

- for pitch and roll axes of the unicycle robot," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3814–3822, 2013.
- [3] L. Morine L., et al. Control Moment Gyroscope Gimbal Actuator Study. BENDIX CORP TETERBORO NJ ECLIPSE-PIONEER DIV, 1966.
- [4] E. Mumm, K. Davis, M. Mahin, and D. Neal, "Miniature Control Moment Gyroscope development." *IEEE Aero-space Conference*, pp. 1–9, 2014.
- [5] S. D. Lee and S. Jung, "A Fuzzy Compensator for a Single-wheel Robot based on Static Instability.", *International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, 2015.
- [6] S. D. Lee and S. Jung, "Experimental Verification of Stability Region of Balancing a Single-wheel Robot: an Inverted Stick Model Approach.", *IEEE IECON*, 2015.
- [7] S. D. Lee and S. Jung, "Single-wheel Robot Balance Control from a Stick Model Point of View", *Institute of Electrical Engineering in Korea*, pp. 1327–1328, 2015.
- [8] J. C. Fang and Y. Ren. "High-precision control for a single-gimbal magnetically suspended control moment gyro based on inverse system method." *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4331–4342, 2011.
- [9] J. C. Fang and Y. Ren, "Decoupling control of magnetically suspended rotor system in control moment gyros based on an inverse system method." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 6, pp. 1133–1144, 2012.
- [10] Y. Ren and J. C. Fang. "High-stability and fast-response twisting motion control for the magnetically suspended rotor system in a control moment gyro." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 5, pp. 1625–1634, 2013.
- [11] Z. S. Wang. "Application of Adaptive Interference Suppressor to Gimbal of MSCMG." *IEEE Fourth International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA)*, pp. 267–269, 2013.
- [12] C. Yang, Z. Li, and J. Li "Trajectory Planning and Optimized Adaptive Control for a Class of Wheeled Inverted Pendulum Vehicle Models", *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 43, no. 1, pp. 24 – 36, 2013.
- [13] J. X and A. Al Mamun, and Y. Daud, "Pendulum balanced autonomous unicycle: Conceptual design and dynamics model", *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 51 – 56, 2011.
- [14] Y. Zhu, Y. Gao, C. Xu, HJ. Jin, and J. Lee "Adaptive Control of a Gyroscopically Stabilized Pendulum and Its Application to a Single-Wheel Pendulum Robot", *IEEE Transaction on Mechatronics*, vol. 25, no. 25, pp. 2004–2016, 2014.
- [15] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, and A. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107–114, 2002.
- [16] S. Kwon and J. Yu, "Tilting-Type Balancing Mobile Robot Platform for Enhancing Lateral Stability.", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1470–1481, 2015.
- [17] T. Insperger, "Stick balancing with reflex delay in case of parametric forcing," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 16, no. 14, pp. 2160–2168, 2011.
- [18] L. Moreno-Ahedo, J. Collado, and C. Vazquez, "Parametric Resonance Cancellation Via Reshaping Stability Regions: Numerical and Experimental Results." *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no.2, pp. 753–760, 2014.

저 자 소 개



이 상 덕 (Sang-Deok Lee)

1998년 전북대학교 전자공학과 졸업. 1998년~2000년 LG정밀 근무. 2003년 전북대학교 전자공학과 석사. 2003년~2014년 삼성중공업연구원. 현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사과정.



정 슬 (Seul Jung)

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 1996년 동 대학 박사 졸업. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 지능로봇 시스템, 밸런싱 시스템, 장애우를 위한 보행 및 휠체어 로봇 설계 및 개발, 가정용 서비스 로봇 개발, 무인비행체, 로봇교육.