

# 대화형 감성 로봇의 메커니즘 설계

김연훈\*, 윤석준\*, 이동연\*, 곽윤근\*\*,

\*: 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* : 한국과학기술원 기계공학과

## Mechanism Design of the Interactive Emotional Robot

Yeon Hoon Kim\*, Sukjune Yoon\*, Dong Yeon Lee\*, Yoon Keun Kwak\*\*

\*: Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, KAIST

\*\* : Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

### Abstract

The mechanism design of the interactive emotional robot has been carried out. The two-wheeled inverted pendulum type mechanism was adopted to improve the mobility and make the innate clumsy monoaxial bicycle motion. Even though the system is unstable in itself, it is expected for the robot to move freely in a plane, keeping the upright position only with two wheels. Two motors attached on head can make 4 motion sets, and two motors on the wheels can make 8. Therefore, 32 independent motion sets can be achieved from the robot to communicate the emotions with humans. The motion's equation of the robot was derived based on nonholonomic dynamics, and the necessary power to the wheel's rotational axis was found by simulation.

Keywords: Emotional Robot(감성 로봇), Inverted Pendulum(역진자), Non-holonomic

### 1. 서론

최근의 로봇 개발의 방향은 산업용 로봇 개발에 주력해 왔던 과거와는 달리 인간과 보다 가까운 주거 및 사무 환경에서 사용이 가능한 로봇으로, 나아가서는 인간과의 감성적 교류가 가능한 감성로봇으로까지 변화되고 있다.

감성 표현이 가능한 로봇 메커니즘은 우선 Humanoid를 들 수 있다. 이는 ASIMO나 SDR 또는 PINO[1]처럼, 2족 보행 개념 등의 제어에 높은 복잡성을 가지고 있는 단점이 있으나, 인간과 가장 비슷한 형태를 가지고 있기 때문에 감성 로봇으로서 가장 적합한 메커니즘이라고 할 수 있다. 다른 메커

니즘으로는, 동물을 형상화한 애완형 로봇 메커니즘을 들 수 있다. 이는 현재 Sony나 Tiger, Bandai등 일본 완구 시장에서 많이 개발되어 시판되고 있는 형태로서, 애완동물이 가지고 있는 인간 친화적 특징과 함께 내부의 성장 알고리즘을 이용하여 일정 기간 지난 뒤의 로봇이 다양한 성격을 가질 수 있도록 하는 로봇도 만들어 지고 있다.

로봇이 감성 표현을 하기 위해서는 감정을 유발할 수 있도록 다양한 센서를 통한 인지의 과정이 필요하며, 인지된 정보를 바탕으로 감정을 생성하여 적절한 표현방법을 통하여 인간과 같은 외부 환경과 교감하는 과정이 필요하다. 이런 감성 흐름의 중심에 있는 감정(Emotion)은 복잡한 유기체에 동기를 부여하는 중요한 역할을 하며, 피조물의 요구나 목적을 위한 주요한 성분으로, 외부환경으로 감정 표출이나 내부의 행동적인 반응을 결정하는 중심에 존재한다[2].

이처럼, 감성 로봇이 완성되기 위해서는 어떤 메커니즘을 적용할 것인가를 우선 고려해야 하며, 그 고려 대상으로는, 우선 개발하고자 하는 메커니즘이 기구학적으로 구현이 가능한가를 타진해 보아야 하고, 그와 동시에 적용하고자 하는 메커니즘이 감성 로봇과 인간 사이의 감성적인 상호 작용을 효과적으로 이루어 지게 할 수 있는가를 점검하여야만 한다.

본 논문에서는 감성 표현 가능한 메커니즘으로 캐스터가 없는 두 바퀴의 역진자 형태로 몸체가 구성되어 구동하는 메커니즘을 채택하였으며, 이러한 형태를 선택하게 된 주요 설계 개념을 2장에서 소개한다. 역진자 형태의 메커니즘의 경우 매순간 자세 제어가 되지 않으면, 시스템 자체의 불안정성으로 인하여 쓰러져 버리는 구조를 가지고 있어서, 이에 대한 제어를 수행하기 위한 시스템 패러미터에 대한 분석을 3장에서 수행하며, 4장에서는 동역학을 수행한 결과를 보여준다. 5장에서는 제자리에 서는 제어에 대한 실험결과를 소개한다.

## 2. 주 설계 개념

개발된 감성로봇은 그림 1과 같이 감성의 표현을 담당하는 머리부분과 바닥에서의 자유로운 주행을 담당하는 몸통의 주행부로 크게 나뉘어 진다. 이 머리-몸통 구조의 로봇은 다음의 네 가지 주요 설계

개념을 바탕으로 설계되었다.

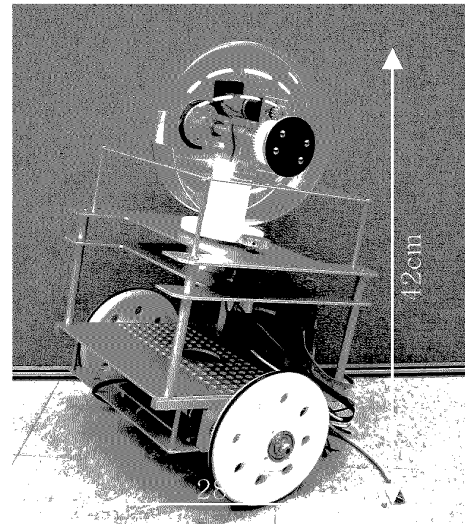


Fig. 1. External Appearance of Emotional Robot

Table 1. Movable Parts

Movable Parts	
Head	2 D.O.F. (pan+ tilt)
Driving Wheel	2 wheels 2motors

첫째로, 외부의 먼지와 같은 오염환경으로부터 내부의 메커니즘 구조가 노출되지 않도록 관절부위의 구조를 구성하였다. 둘째로, 어린아이부터 노인에 이르기까지 다양한 연령층의 사용에서 로봇이 안전할 수 있도록, 다소 충격에 취약한 목 부위의 관절이 튼튼할 수 있도록 다단의 플레이트로 관절 축을 보호할 수 있도록 설계하였다. 셋째로, 표 1과 같이 감성의 전달을 충분히 표현할 수 있도록 머리부분에 두개의 모터를 두어 pan 운동과 tilt 운동을 각각 담당하게 하였다. 마지막으로, 주 구동부의 움직임 자체가 감성을 유발할 수 있도록 캐스터가 없는 두개의 바퀴를 사용하여 자세제어와 함께 빠른 주행이 가능하도록 하였다.

보통의 안정적인 네 바퀴 구조는 운동성에서 많은 제약을 가지게 되어 결국에 감성적인 표현마저도 제한 받을 수 있어서, 안정성보다 운동성을 강조한, 캐스터 없는 두 바퀴 구동 형태로 설계하였다.

머리와 바퀴에 구성된 4개의 모터로부터 다양한 제스처를 구성하여 감성적인 동작을 부여한다. 우선 머리의 두 개의 모터로부터 좌우로 흔들기와 아래위로 흔들기의 조합으로 네 개의 모션이 형성되며, 몸

체에 부착된 두 개의 바퀴로부터 선형 직진 구동, 제자리 돌기, 원거리 선회의 모션과 자세를 제어하는 앞뒤의 기울어짐 모션이 모두 조합되어 32개의 제스처를 감성의 전달 도구로서 선택할 수 있다.

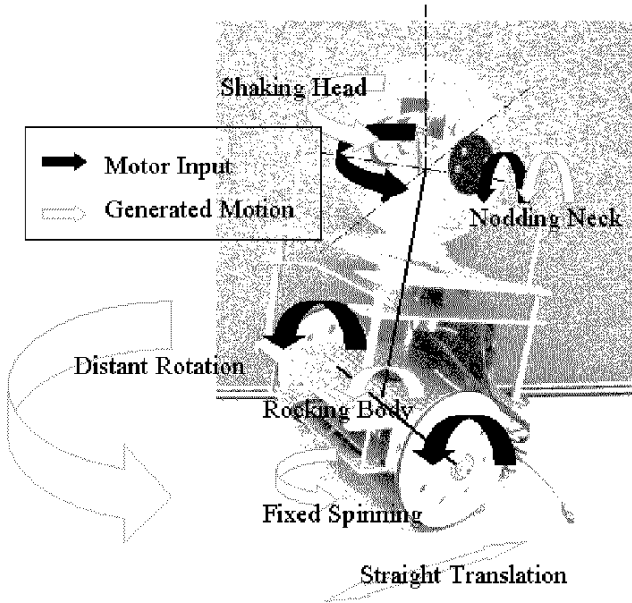


Fig. 2. Motor Inputs & Possible Motions

### 3. 시스템 패러미터

설계 제작된 로봇 시스템의 동적 거동을 살펴볼 수 있는 동역학을 구하기 위하여 시스템의 각종 패러미터를 구하였다.

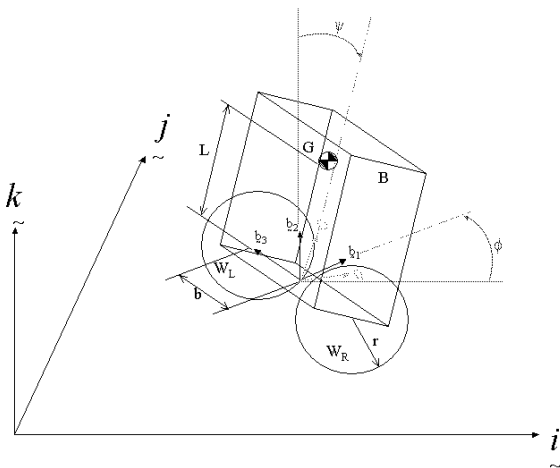


Fig. 3. Coordinates of Robot System

설계된 시스템의 좌표계 내에서의 위치는 위의 그림 3과 같고, 시스템의 주요 패러미터의 의미와 측

정치는 표 2와 같이 구성된다.

Table. 2. Nomenclature & System Parameters

G	center of gravity of body part
B	body part
$W_L$	left wheel
$W_R$	right wheel
r	radius of wheel
b	distance from center to each wheel
L	distance from center to C.G.
$\phi$	rotation angle about k-axis
$\psi$	inclination angle of body part
<i>Body</i>	
Mass	4.315kg
R. Inertia	0.2212kgm <sup>2</sup>
L	0.1m
<i>Wheel</i>	
Mass	0.420kg
R. Inertia	0.0012kgm <sup>2</sup>
r	0.075m

### 4. 동역학

설계된 로봇은 지면과 로봇의 바퀴 사이의 미끄러짐이 없다고 가정되는 Non-holonomic 시스템이다. Holonomic 시스템과 Non-holonomic 시스템에 대하여 비교 설명하고 설계된 로봇 시스템의 동역학 방정식을 유도하였고, 그로부터 시스템의 자유도를 계산하였다.

우선 Holonomic 시스템은 식 (1)과 같은 형태로 주어지는 구속 방정식들로 표현되는 시스템이다.

$$\phi_j(q_1, q_2, \dots, q_n, t) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

반면에 Non-holonomic 시스템은 구속 방정식들의 형태가 식 (2)처럼 미소 변화량의 형태로 밖에 표현될 수 없는 것으로 구성된 시스템이다.

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} \dot{q}_i + a_{jt} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

한편 이렇게 구성되는 Non-holonomic 시스템의 Lagrange 방정식은 식 (3)처럼 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_i} \right) - \sum_{j=1}^m \lambda_j a_{ji} = Q_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (3)$$

시스템의 구성 변수(configuration variables)은 다음의 13개를 선택하였다.

$$\underline{X}^T = (X_L, Y_L, \theta_L, X_R, Y_R, \theta_R, X_C, Y_C, X_G, Y_G, Z_G, \phi, \psi) \quad (4)$$

좌, 우 바퀴의 각각의 x, y 위치와 회전각  $(X_L, Y_L, \theta_L, X_R, Y_R, \theta_R)$ , 두 바퀴 사이의 중간 지점의 x, y 위치  $(X_C, Y_C)$ , 그리고, 물체의 무게 중심의 공간 상의 위치  $(X_G, Y_G, Z_G)$ 와 함께 물체의 2차원 평면상에서의 회전각과 자세의 기울어짐 각  $(\phi, \psi)$ 을 택하였다.

식 (1)과 (2)에 대응하는 시스템의 구속 방정식을 식 (5)와 식 (6)과 같이 얻었다.

$$\begin{aligned} X_G - X_C - L \sin \psi \cos \phi &= 0 \\ Y_G - Y_C - L \sin \psi \sin \phi &= 0 \\ Z_G - L \cos \psi &= 0 \\ X_C - b \sin \phi - X_L &= 0 \\ X_C + b \sin \phi - X_R &= 0 \\ Y_C + b \cos \phi - Y_L &= 0 \\ Y_C - b \cos \phi - Y_R &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_L \cos \phi + \dot{Y}_L \sin \phi &= R \dot{\theta}_L \\ \dot{X}_R \cos \phi + \dot{Y}_R \sin \phi &= R \dot{\theta}_R \\ -(\dot{X}_R + \dot{X}_L) \sin \phi + (\dot{Y}_R + \dot{Y}_L) \cos \phi &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

또한, 바퀴의 운동에너지와 물체의 운동에너지를 구하면, 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$T = T_{body} + T_{wheels} \quad (7)$$

$$T_{body} = \frac{1}{2} I_b \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} J_b \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} M_b V_b^2$$

$$T_{wheels} = \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta}_R^2 + \dot{\theta}_L^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} M_w (\dot{X}_R^2 + \dot{Y}_R^2) + \frac{1}{2} M_w (\dot{X}_L^2 + \dot{Y}_L^2)$$

그리고 위치 에너지는 물체의 무게 중심의 위치의 변화에 의해 식 (8)처럼 구해진다.

$$V = M_T g h = M_T g (R + Z_G) \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터, Lagrangian,  $L$ 은 식 (9)와 같이 얻어진다.

$$L = T_{body} + T_{wheels} - V \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} I_b \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} J_b \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} M_b V_b^2 + \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta}_R^2 + \dot{\theta}_L^2) + I_2 \dot{\phi}^2 \\ &+ \frac{1}{2} M_w (\dot{X}_R^2 + \dot{Y}_R^2 + \dot{X}_L^2 + \dot{Y}_L^2) - M_T g (R + Z_G) \end{aligned}$$

식 (9)를 이용하여, 시스템 구성변수 13개에 대하여 각각 식 (3)의 형태로 13개의 Lagrange 방정식을 구할 수 있다. 따라서, 10개의 구속 방정식을 포함하여 23개의 방정식이 얻어지며, 미지수는 Lagrangian multiplier를 포함하여 23가 존재하여, 해를 구할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 13개의 시스템 구성 변수에서 10개의 구속 조건을 제외 하면, 시스템의 자유도(DOF)는 3개가 됨을 알 수 있다. 이는 공간 상에서 시스템의 물체가 x, y 위치와 회전각이 접선방향으로의 순간움직임만 허용함으로써 구속하고, 물체 축에 대한 기울어짐을 포함하여 3개의 자유도를 가짐을 의미한다.

## 5. 로봇의 자세 제어

로봇 시스템이 자연스러운 감성적 동작을 수행하는 것이 이루어지기 위해서는, 우선 캐스터 없는 불안정한 로봇의 물체를 안정적으로 세우는 제어가 필요하다.

우선, 1차원적인 물체의 기울어짐 각을 제어하기 위하여 시스템을 그림 4와 같이 간략화 하여 제어를 수행하였다[3].

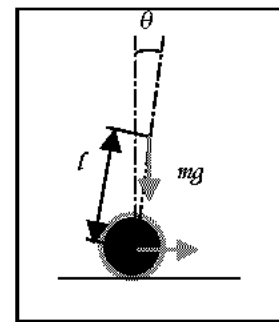


Fig. 4. Simplified Model of Wheeled Inverted Pendulum

제어 루프는 그림 5와 같고, 기울어짐 각 정보를 피드백 하여 PID 제어 계인을 구하여 제어를 수행하였다.

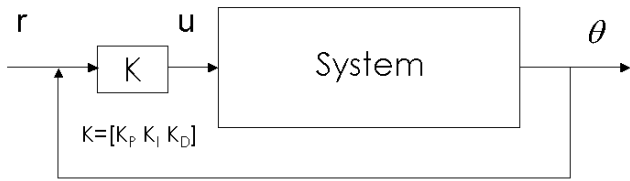


Fig. 5. Block Diagram of Control Loop

실험에 사용된 센서와 액추에이터의 사양은 표 3과 같다.

Table 3. Specification of Sensor & Actuator

CXTA 01 Tilt Sensor (Crossbow™)	
Linear Angular Range	±20°
Angular Resolution	0.05° rms
Sensitivity - small angles	35mV/°
Bandwidth	125 Hz
Size	1.91x4.763x2.54 cm <sup>3</sup>
Output	analog
Maxon™ DC Motors with Encoders	
Assigned Power Rating	11W
Total Gear Reduction	68.67:1
Rotor Inertia	12.40gcm <sup>2</sup>

액추에이터의 파워는, 앞서 구한 동역학으로부터 로봇의 제어에 필요한 각종 인자들에 대한 시뮬레이션을 그림 6과 같이 수행하여, 적합한 사양이 7W정도임을 확인하여, 그 이상의 값을 가진 11W의 동력을 가진 모터를 선정하였다.

실제로 제어가 이루어지는 순서는 그림 7과 같다. 우선 제어 루프를 돌기 전에 모터의 초기화를 수행한다. 모터 초기화가 완료된 후 본격적인 제어가 이루어지며, 센서 신호를 받아 디지털화 한 후 그 값의 미분, 적분 값을 수치적으로 계산하여, PID Gain 값을 각각 곱하여 바퀴의 구동 토크량을 결정하게 되며 원하는 값이 나올 때까지 반복 계산한다.

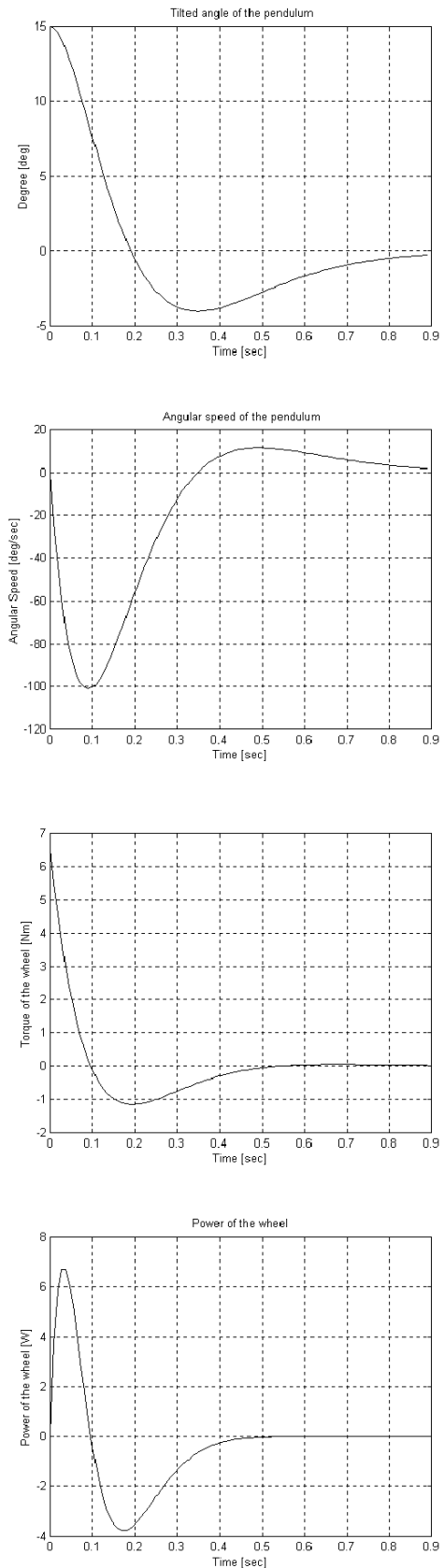


Fig. 6. Simulation Results (Tilt Angle, Angular Velocity, Required Torque, Required Power)

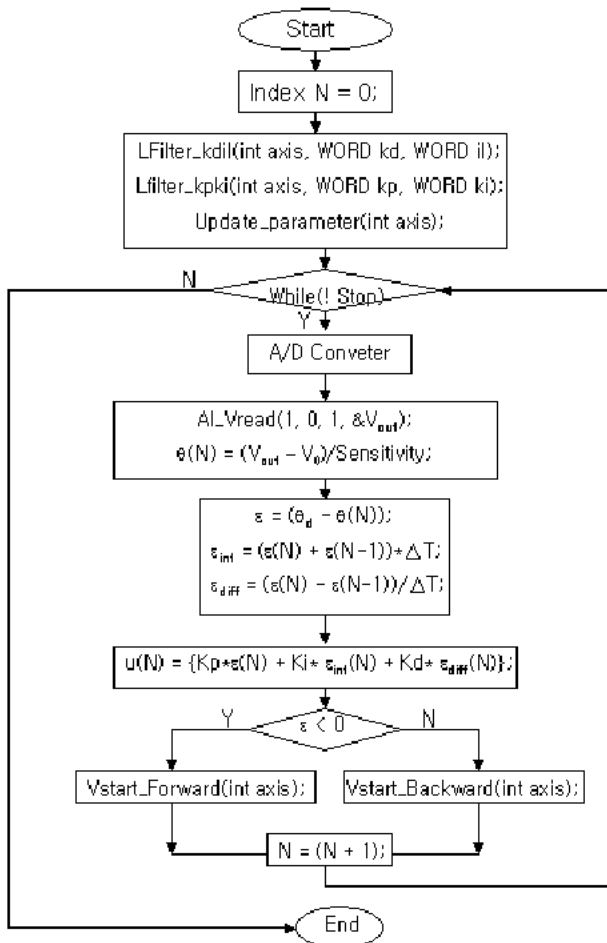


Fig. 7. Control Flow Chart

## 6. 결론

감성 표현이 가능한 로봇의 메커니즘을 제안해 보았다. 주 구동부가 두 바퀴로 구성되며, 역진자 형태를 가져서 이동성능을 향상 시킴과 함께 메커니즘 형태 자체로 인간의 감성을 호소할 수 있는 재미있는 구조를 가지고 있다. 한편, 머리부에 2개의 모터를 두어, 다양한 표현을 담당하도록 설계하였다. 이 밖에도 내구성 등을 고려한 설계 인자들을 소개하였다.

여러 동적 특성을 살펴보기 위하여 시스템의 동역학을 구하였으며, 감성적 제스처가 수행되기 위한 선행 단계인 제자리 서기 제어를 수행하여 보았다. 제작된 시스템의 동작 결과를 바탕으로 충분히 감성적 동작을 수행 할 수 있는 가능성을 확인하였고, 앞으로 머리의 동작과 주 구동의 경로 추적 제어 등의 모션 제어와 인지된 감성정보와의 연결에 대한 연구를 수행할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 G-7 감성공학 기반기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Kitano, et al., "Design and Architecture of SIG the Humanoid," *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000, 181-190
- [2] Robert Plutchik, "Emotions in the Practice of Psychotherapy clinical implications of affect theories," 2000, American Psychological Association.
- [3] K. Yamafuji and T. Kawamura, Postural control of monoaxial bicycle, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 7(4), 1989, 74-79