

횡방향 틸팅 기능을 갖는 이륜 밸런싱 모바일 플랫폼 설계

Design of a Two-wheeled Balancing Mobile Platform with Tilting Motion

김 상 태, 서 정 민, 권 상 주*

(Sangtae Kim¹, Jeongmin Seo¹, and SangJoo Kwon^{1,*})

¹School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract: Conventional two-wheeled balancing robots are limited in terms of turning speed because they lack the lateral motion to compensate for the centrifugal force needed to stop rollover. In order to improve lateral stability, this paper suggests a two-wheeled balancing mobile platform equipped with a tilting mechanism to generate roll motions. In terms of static force analysis, it is shown that the two-body sliding type tilting method is more suitable for small-size mobile robots than the single-body type. For the mathematical modeling, the tilting-balancing platform is assumed as a 3D inverted pendulum and the four-degrees-of-freedom equation of motion is derived. In the velocity/posture control loop, the desired tilting angle is naturally determined according to the changes of forward velocity and steering yaw rate. The efficiency of the developed tilting type balancing mobile platform is validated through experimental results.

Keywords: two-wheeled robot, balancing robot, inverted pendulum robot, tilting mechanism, posture control

I. 서론

세그웨이(segway) 등장 이후에 이륜 밸런싱 로봇은 많은 대중적인 관심을 받고 있다. 이륜 밸런싱 로봇은 양 바퀴 구동에 의해 3자유도 운동(직진, 피치, 요)을 구현함으로써 협소하고 혼잡한 지역에서 효율적인 주행이 가능하다는 장점을 갖는다. 밸런싱 로봇에 대한 연구는 JOE [1], N-bot [2] 등에서 시작되었다고 할 수 있으며 GM의 EN-V [3], TOYOTA의 Winglet [4], Segway [5] 등은 인간 탑승형으로 개발되었다. 특히 Segway는 초창기에 차세대 친환경 개인용 주행기기로서 많은 주목을 받았고 21세기 최고의 발명품 중 하나가 될 것이라는 성급한 평가를 받기도 하였다. 그러나 높은 가격, 주행 안정성, 기동성 측면에서 여전히 문제점을 드러내고 있으며 초기의 예상과는 달리 아직까지 개인용 주행기기로서의 위치를 확보하지 못하고 있다.

그 동안 역진자 구조를 갖는 밸런싱 로봇의 주행 성능 및 안정성을 개선하기 위하여 전통적인 선형제어 기법[1,6] 뿐만 아니라 SDRE 제어[7], 퍼지제어[8] 등의 비선형제어 기법들이 적용되었다. [9]에서는 탑승자 동작에 의해 발생하는 무게 중심 변화를 고려한 제어기 설계가 이루어졌다. 또한 [10]에서는 언덕 주행 시의 안정성 향상을 위하여 탑승자에 의해 발생하는 힘과 경사각을 추정하였으며, [11]에서는 로봇의 모든 방향 운동을 고려한 통합적인 제어기 설계를 시도하였다.

밸런싱 로봇은 선회주행 시에 불안정성이 증가하는데 그 이유는 구조적으로 횡방향 롤 운동성이 없기 때문이다. 특히

주행속도가 빠른 경우에는 선회 동작 시에 큰 원심력이 발생하므로 전복 위험성은 그 만큼 증가한다. 원심력은 속도의 제곱에 비례하므로 전복을 방지하기 위해서는 주행속도를 일정한 크기 이하로 제한하거나 선회 반경을 충분히 크게 해야 한다. 기존의 제어기법들은 원심력 효과가 크지 않은 주행 상황만을 가정하고 있으며 사실 제어 알고리즘만으로는 밸런싱 로봇의 안정성을 향상시키는 것은 한계가 있다.

근본적으로 밸런싱 로봇의 횡방향 안정성을 확보하기 위해서는 양 바퀴 운동에 의한 피치(pitch), 요(yaw) 운동과는 별도로 로봇 차체에 롤(roll) 운동 메커니즘을 도입하는 것이 필요하다. 로봇 차체에 롤 운동성을 부여하면 선회주행 시에 발생하는 원심력을 중력 효과에 의해 능동적으로 보상할 수 있으며 그만큼 주행 중의 기동성을 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 밸런싱 로봇의 롤 운동을 구현하기 위해 틸팅 기법을 도입한다.

이동 수단에 틸팅 기법을 적용한 대표적인 예로서는 틸팅 열차가 있으며 이미 여러 국가에서 실용화되어 운행 중에 있다[12]. 모바일 로봇의 경우, [13]에서는 바퀴-다리 복합구조를 채택한 사륜형 로봇을 설계하고 다리 관절의 회전에 의한 틸팅 모션을 구현하였으며, [14]에서도 틸팅 동작을 이용한 원심력 보상 개념을 제시하였다. 또한 [15]에서는 볼스크류 기구를 이용한 틸팅형 밸런싱 휠체어를 설계하였으며, [16]은 본 논문의 선행 연구결과에 해당된다.

본 논문에서 제안하는 틸팅형 밸런싱 모바일 플랫폼은 이륜 밸런싱 로봇의 기존 3자유도 운동(직진, 피치, 요)에 롤 운동이 추가되어 총 4자유도의 운동성을 갖는다. 먼저 II 장에서는 두 가지 틸팅 방식을 비교하고, 정역학적 분석을 바탕으로 차체 분리형 틸팅 메커니즘을 제안한다. III 장에서는 차체 설계 및 시스템 구성을 다룬다. IV 장에서는 틸팅형 이륜 밸런싱 플랫폼 대한 운동방정식을 유도한다. V 장에서는 제

* Corresponding Author

Manuscript received August 22, 2013 / revised October 28, 2013 / accepted November 25, 2013

김상태, 서정민, 권상주: 한국항공대학교 항공우주기계공학부
(kimonkey@kau.ac.kr/jmseoo@kau.ac.kr/sjkwon@kau.ac.kr)

※ 이 논문은 2012 한국연구재단 일반연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012R1A1B3003886).

어기 설계 및 주행실험 결과를 다루며 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 틸팅 방식 비교 분석

1. 틸팅 방식 비교

이론 밸런싱 로봇이 횡방향으로 틸팅 동작을 할 수 있으면 선회주행 시에 발생하는 원심력 모멘트를 틸팅 모션에 의한 중력 모멘트로 보상함으로써 로봇이 전복되는 것을 방지할 수 있으며 비틸팅 방식에 비해 선회 반경을 대폭 줄일 수 있다. 또한 경사지에서는 임의의 주행 방향에 대하여 항상 직립자세를 유지함으로써 주행 안정성을 증가시킬 수 있다.

틸팅 열차의 경우에는 그림 1(a)처럼 휠구동부를 제외한 차체 전체를 동시에 틸팅하는 차체일체형 틸팅방식을 채택하고 있다[12]. 이 방식은 고정된 철도를 따라 주행하는 열차의 특성에 적합하며 승객(더미)을 포함한 탑승부(차체) 전체가 틸팅 구동기에 의해 롤 운동을 한다. 또한 그림 1(b)처럼 차체를 좌우로 분리시키고 서로 반대방향으로 슬라이딩 시킴으로써 롤 운동이 일으키는 차체분리형 틸팅 방식이 가능하다. 이러한 방식은 모바일 로봇과 같이 중량이 작은 차체에 적합하다. 차체분리형 방식은 일체형 방식에 비해 틸팅 운동에 필요한 구동력을 크게 줄일 수 있다는 장점이 있지만 차체의 강성(stiffness)이 감소하고 더미 탑승부를 자유롭게 설계할 수 없다는 단점을 갖는다.

2. 정역학 해석

두 방식에 대한 정역학적 비교를 위하여 그림 2와 같이 강체에 대한 자유물체도를 고려할 수 있다. 우선 차체일체형은 그림 2(a)와 같이 두 개의 틸팅 구동기(F_1, F_2)에 의해 차체와 더미를 지지하며 구동기의 변위 차에 의해 양방향으로 틸팅을 일으키는 형태이다. 이 때 하부 휠구동부의 중량은 틸팅 힘에 영향을 미치지 않으므로 자유물체도에는 표시되지 않았다.

그림 2(a)에서 중력과 반력에 대한 힘 평형식, P_1 과 P_2 점에 대한 모멘트 평형식을 세우고 정리하면 각 구동기에 요구되는 틸팅 힘은 다음과 같이 산출된다.

$$F_1 = \{h_B m_B + (h_D + l_B) m_D\} (g/d) \sin \phi + m_D (g/2) \cos \phi + m_B (g/2) \cos \phi \quad (1)$$

$$F_2 = -\{h_B m_B + (h_D + l_B) m_D\} (g/d) \sin \phi + m_D (g/2) \cos \phi + m_B (g/2) \cos \phi \quad (2)$$

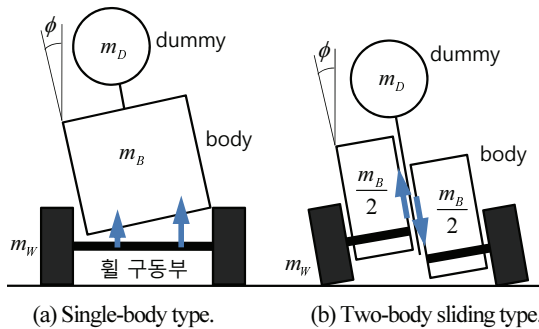


그림 1. 차체에 따른 틸팅 방식 비교.

Fig. 1. Comparison of tilting methods.

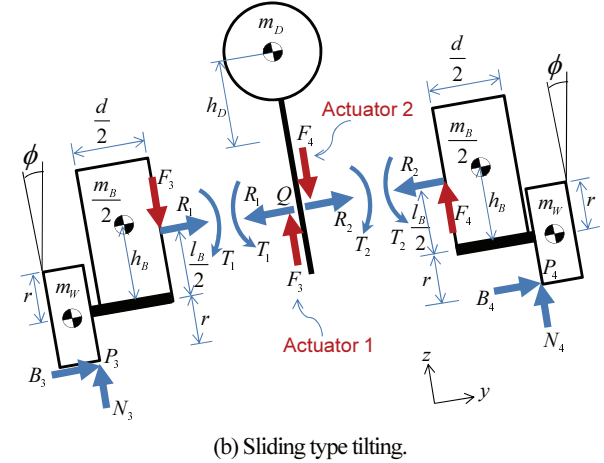
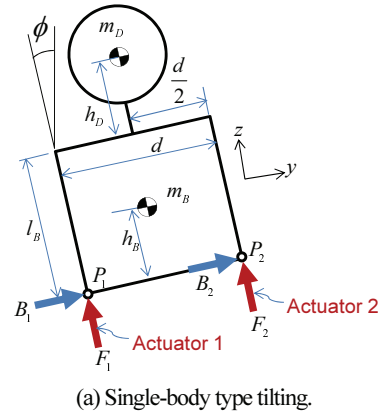


그림 2. 틸팅에 요구되는 구동기 힘 분석.

Fig. 2. Analysis of the required tilting forces.

다음에 차체분리형은 그림 2(b)와 같이 휠구동부를 포함하는 좌우 차체와 더미(가반하중)를 탑재하는 플랫폼을 합하여 세 개의 강체로 구성된다고 가정할 수 있다. 두 구동기(F_3, F_4)가 같은 방향으로 움직이면 차체가 상승 또는 하강하게 되며, 서로 반대 방향으로 움직이면 좌우 차체가 서로 슬라이딩함으로써 틸팅 모션이 발생한다. 따라서 일체형과는 달리 휠구동부의 중량이 틸팅 힘에 영향을 미친다. 그림에 표시한 바와 같이 분리된 차체 사이에는 상호 반력(R_1, R_2)과 반력모멘트(T_1, T_2)가 존재한다. 이 때 반력은 분포하중의 평균이며 차체의 중간에 위치한다고 가정한다. 또한 바퀴의 너비 효과는 무시하며 바퀴의 중심축은 차체 하부에 연결된다고 가정한다.

그림 2(b)에서 각 강체에 대한 힘 평형식과 모멘트 평형식을 세우고 모든 식을 정리하면 최종적으로 틸팅에 요구되는 힘을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$F_3 = \{h_B m_B + (h_D + l_B) m_D\} (g/d) \sin \phi + m_D (g/2) \cos \phi + r(2m_W + m_B + m_D) (g/d) \sin \phi \quad (3)$$

$$F_4 = -\{h_B m_B + (h_D + l_B) m_D\} (g/d) \sin \phi + m_D (g/2) \cos \phi - r(2m_W + m_B + m_D) (g/d) \sin \phi \quad (4)$$

한편, 두 틸팅 방식에 대한 구동력 (1), (2)식과 (3), (4)식은 밑줄 친 항들에서 차이가 발생한다. 이 차별항들을 서로 비

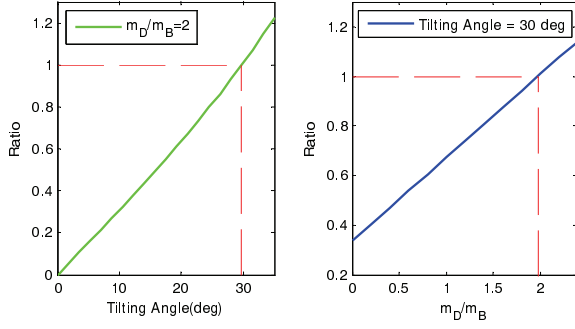


그림 3. 더미/차체 무게 비와 틸팅각 변화에 따른 (5)식 비의 변화. ($r/d=0.3$ 인 경우).

Fig. 3. Variation of Eq. (5) ratio according to the changes of dummy/body weight and tilting angle.

교해보면 일체형에서는 차체 질량(m_B) 만이 관련되어 있는 반면에 분리형(슬라이딩형)에서는 바퀴, 차체, 더미의 모든 질량이 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그리고 일체형의 차별항은 틸팅각의 코사인 함수에 의존하지만 분리형에서는 사인 함수에 의존한다. 여기서 두 차별항의 비(ratio)는 다음 식과 같다.

$$\text{Ratio} = \frac{\text{분리형 차별항}}{\text{일체형 차별항}} = 2 \left(\frac{2m_w + m_B + m_D}{m_B} \right) \frac{r \sin \phi}{d \cos \phi} \quad (5)$$

위 식이 1보다 크면 분리형이 일체형에 비해 대략적으로 더 큰 힘을 요구하는 것을 의미한다. 틸팅각이 클수록 그리고 전체 무게에서 바퀴와 더미 부분이 클수록 (5)식은 큰 값을 산출하므로, 이 때는 일체형이 구동력 측면에서 더 유리하다고 할 수 있다. 한편, 바퀴 질량을 무시하고 틸팅각 및 더미/차체 무게 비의 변화에 대하여 (5)식을 계산하면 그림 3과 같은 결과를 얻는다. 결과적으로 틸팅각이 30도일 때는 더미가 차체보다 2배 이상 무거운 경우, 더미 무게가 차체 무게의 2배일 때는 틸팅각이 30도 이상인 경우에 일체형이 더 작은 틸팅 구동력을 요구한다.

일반적으로 틸팅각은 20도 미만이고 모바일 로봇의 경우에는 상대적으로 차체에 비해 더미 무게가 작다는 점을 고려하면 틸팅 구동력 절감 측면에서 차체분리형 방식이 적합하다. 특히, 틸팅각이 작으면 분리형의 틸팅 구동기는 역학적으로 더미 무게만을 지지하는 형태를 띄게 된다.

III. 차체 설계 및 시스템 구성

1. 차체 설계

본 논문에서 개발된 틸팅형 밸런싱 모바일 로봇은 그림 4와 같이 휠 구동부와 틸팅 구동부가 장착된 좌우 차체 블록으로 구성되며 두 블록은 더미 장착을 위한 중앙부의 플랫폼과 연결된다. 휠 모터의 구동력은 벨트-풀리를 통해 좌우 바퀴에 전달되며 틸팅 모터의 구동력은 랙-피니언을 통해 좌우 블록을 움직인다. 좌우 차체는 리니어 부쉬의 안내를 따라 상하 운동을 한다. 이 때 두 개의 틸팅용 모터가 서로 반대 방향으로 동작하면 좌우 블록이 슬라이딩하면서 틸팅 운동이 발생하고, 같은 방향으로 동작하면 플랫폼이 상승 또는 하강한다.

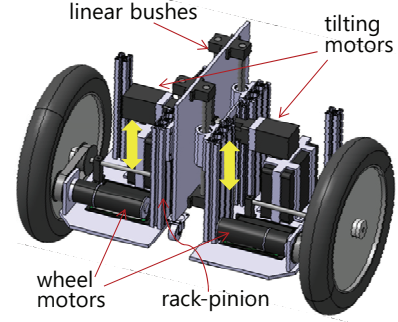


그림 4. 틸팅형 밸런싱로봇의 분리형 차체 구성.

Fig. 4. Separated body of the tilting type balancing robot.

한편, 벨트-풀리 기구는 장력을 일정하게 유지 관리해야 하는 단점이 있지만 지면에서 전달되는 충격으로부터 구동기를 보호할 수 있고 높은 감속비를 얻을 수 있다. 랙-피니언은 큰 하중을 지탱하기에는 불리하지만 작은 공간에서 직선 운동을 구현하기에 유리하다. 최종적으로 완성된 로봇의 형상은 그림 5와 같으며 주요 제원은 표 1과 같다.

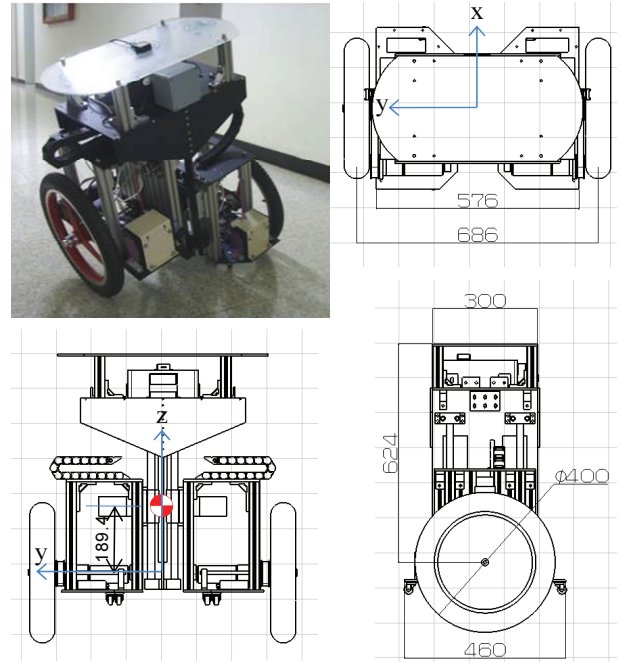


그림 5. 틸팅형 밸런싱 로봇의 외형.

Fig. 5. Configuration of the developed tilting-balancing robot.

표 1. 틸팅형 밸런싱 로봇의 제원.

Table 1. Specifications of the developed tilting robot.

크기(D×L×H)	686×460×784 mm
무게(weight)	50.7 kgf
무게중심 위치	$x_{CG} = 6.1mm$, $z_{CG} = 189.4mm$ (바퀴 축으로부터 거리)
바퀴 지름	16 in
최대속력	20 km/h
최대 피칭각	41 deg
최대 틸팅(롤)각	33 deg

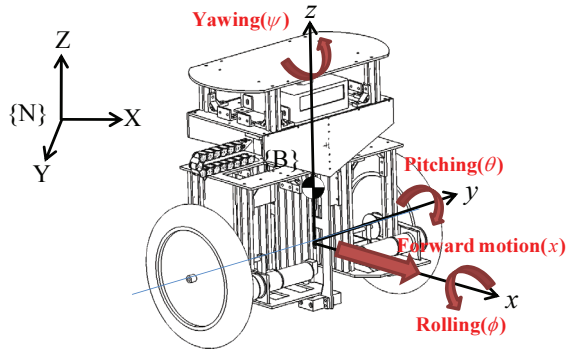


그림 6. 틸팅형 밸런싱 로봇의 자유도.

Fig. 6. Degrees of freedom of the tilting-balancing robot.

2. 시스템 구성

휠 모터를 선정하기 위해 한 쪽 바퀴에 가해지는 부하를 로봇의 예상 최대 중량의 절반인 25 kgf로 가정한다. 로봇의 최대속도를 20 km/h, 가속시간을 10초로 설정하고 부하관성, 필요 등속토크, 가속토크를 계산한다[17]. 이러한 스펙들을 만족시키는 구동기로서 Maxon사의 RE-50-370354 모델(21:1 감속기어 포함)을 휠 모터로 결정하였다. 다음에 틸팅 구동기를 선정하기 위해서 (3)식을 근거로 틸팅에 요구되는 힘을 계산한다. 이에 해당하는 요구 토크를 만족시키는 구동기로서 Electrocraft사의 스텝 모터 TPP23-240-A40(5:1 감속기어 포함)을 선정하였다. 자세제어를 위한 자이로 센서로는 Microinfinity 사의 XA-3300을 사용하고 배터리는 24 Volt 리튬-이온 전지를 사용한다. 한편 모든 제어 프로그램은 Windows 환경에서 MFC 기반으로 개발하였으며 연산은 로봇에 탑재된 Micro-itx타입의 미니 PC에서 수행된다.

IV. 운동방정식 모델링

1. 비선형 운동방정식

일반적으로 이륜 밸런싱 로봇은 직진 운동과 피치 운동이 서로 강한 동적 연성 관계에 있으며 종방향 운동을 카트-역진자 시스템으로 모델링 할 수 있다[18]. 틸팅형 밸런싱 로봇은 직진, 피치, 요 운동에 틸팅 동작에 의한 롤 운동이 추가되어 총 4자유도 운동을 한다. 기존 밸런싱 로봇이 피치 방향으로 2차원 역진자 운동을 하는 것에 비해 틸팅형 밸런싱 로봇은 3차원 역진자 운동을 한다고 가정할 수 있다.

그림 6에 표시한 바디 좌표계 {B}에 대하여 Lagrange 방법 또는 Kane's 방법[19]을 적용하면 다음과 같은 비선형 형태의 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{1\phi}(\theta) & 0 & a_{1\psi}(\phi, \theta) & 0 \\ 0 & a_{2\theta} & a_{2\psi}(\phi) & a_{2x}(\theta) \\ a_{3\phi}(\phi, \theta) & a_{3\theta}(\phi) & a_{3\psi}(\phi, \theta) & a_{3x}(\phi, \theta) \\ 0 & a_{4\theta}(\theta) & a_{4\psi}(\phi, \theta) & a_{4x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, \dot{x}) \\ f_2(\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, \dot{x}) \\ f_3(\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, \dot{x}) \\ f_4(\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{1g}(\phi, \theta) \\ f_{2g}(\phi, \theta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_T \\ -(T_L + T_R)\cos\phi \\ (T_R - T_L)d/r \\ (T_L + T_R)/r \end{bmatrix} \quad (6)$$

표 2. 틸팅형 밸런싱 로봇의 모델 파라미터들.

Table 2. Model parameters of the tilting-balancing robot.

파라미터	정의
ϕ, θ, ψ	롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 각
d	양 바퀴 축간 거리
l	양 바퀴 중심과 무게중심 사이 거리
m_p	로봇 차체(m_B) + 더미(m_D) 질량
m_w	바퀴 질량
r	바퀴의 반지름
T_L, T_R	좌우 바퀴의 구동토크
T_t	틸팅 토크
I_1, I_2, I_3	{xyz}축에 대한 질량관성 모멘트(MOI)
J	바퀴 회전축에 대한 바퀴의 MOI
K	지면과 수직 방향에 대한 바퀴의 MOI

위 식에 나타난 바와 같이 밸런싱 로봇은 역진자 특성을 갖기 때문에 모든 상태변수들이 동역학적으로 서로 강하게 연성되어 있다. 운동방정식의 각 파라미터는 표 2에 정의되어 있으며 각 행렬 항에 대한 세부 식은 부록에 수록되어 있다.

2. 근사 운동모델

앞 절에서는 틸팅형 밸런싱 로봇을 3차원 역진자 모델로 가정하고 운동방정식을 유도하였다. 그러나 그림 6에서 횡방향 틸팅에 의한 롤 운동은 피치 운동 만큼 자유로운 진자운동을 하지 않는다. 우선 횡방향으로는 바퀴가 지면과 두 점에서 접촉한다. 그리고 롤 운동을 일으키는 틸팅 구동기는 차체와 더미의 무게를 지탱할 수 있는 충분한 힘을 발생시켜야 하므로 볼스크류나 랙-피니언 같이 감속비가 높은 동력전달기구를 사용해야 한다. 결과적으로 틸팅 축은 다른 운동 축에 비해 속도 변화가 작으며 역구동능력(back drivability)이 매우 약하다. 즉, 틸팅 동작에 의한 롤 상태 값의 변화가 동적으로 연성되어 있는 다른 상태 값들에 영향을 주지만, 상대적으로 다른 상태 값들의 변화는 롤 운동에 큰 영향을 주지 못한다.

위와 같은 가정 하에 (6)식에서 롤 방향 동역학을 무시하면 다음 3자유도 운동 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} a_{2\theta} & a_{2\psi}(\phi) & a_{2x}(\theta) \\ a_{3\theta}(\phi) & a_{3\psi}(\phi, \theta) & a_{3x}(\phi, \theta) \\ a_{4\theta}(\theta) & a_{4\psi}(\phi, \theta) & a_{4x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2(\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, \dot{x}) \\ f_3(\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, \dot{x}) \\ f_4(\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{2g}(\phi, \theta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(T_L + T_R)\cos\phi \\ (T_R - T_L)d/r \\ (T_L + T_R)/r \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 식에서 각 행렬 항은 부록에 수록된 식들과 동일하다. 그러나 직진, 피치, 요 방향의 운동은 롤 각, 롤 각속도($\phi, \dot{\phi}$)의 함수로서 (7)식을 연산하기 위해서는 구동 토크 외에 롤 상태값이 실시간으로 주어져야 한다. 롤 값은 주어진 목표 궤적에 따라 계산하거나, 실험의 경우에는 자이로 센서를 통해 직접 획득할 수 있다.

한편, (7)식을 평형 점에 대하여 선형화하면 다음과 같은

선형 상태방정식을 얻을 수 있다. 이것은 기존의 이륜 밸런싱 로봇과 동일한 결과이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_2 & b_2 \\ 0 & 0 \\ -b_4 & b_4 \\ 0 & 0 \\ b_6 & b_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_L \\ T_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

where

$$\begin{aligned} a_{21} &= -m_p l g (m_p + 2m_w + 2J/r^2) / C_1, \\ a_{61} &= m_p^2 l^2 g / C_1, \\ b_2 &= (m_p + 2m_w + (2J + m_p r l) / r^2) / C_1, \\ b_4 &= d / C_2, \\ b_6 &= -(m_p l + (m_p l^2 + I_2) / r) / C_1, \\ C_1 &= m_p^2 l^2 - (m_p + 2m_w + 2J/r^2)(m_p l^2 + I_2), \\ C_2 &= (I_3 + 2m_w d^2 + 2d^2 J / r^2 + 2K)r \end{aligned}$$

V. 제어기 설계 및 주행실험

1. 속도/자세 제어기 설계

밸런싱로봇이 원하는 자세와 속도를 유지하면서 주행하기 위해서는 양 바퀴에 필요한 토크를 계산하고 이를 휠 모터 드라이버에 입력해야 한다. 본 논문에서 제시하는 제어기는 그림 7과 같이 직진속도(\dot{x}_{ref})와 스티어링을 위한 요 각속도($\dot{\psi}_{ref}$)를 외부 기준명령으로 인가하며 피치각은 항상 영을 유지시킨다.

선회 주행 시의 기준 틸팅각은 횡방향으로 발생하는 원심력에 비례하는 값으로 산출하는 것이 타당하다. 로봇의 전방 속도, 요 각속도, 선회반경이 각각 $\dot{x}, \dot{\psi}, \rho$ 이라면 원심력의 크기는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$F_c = m\rho\dot{\psi}^2 = m\dot{x}\dot{\psi} \quad (9)$$

따라서 속도에 대한 기준 명령이 주어지면 틸팅각에 대한 기준 명령은 다음과 같이 결정된다.

$$\phi_{ref} = kF_c = k(m\dot{x}_{ref}\dot{\psi}_{ref}) \quad (10)$$

여기서 비례상수 k 는 로봇에 발생하는 최대 원심력과 최대 틸팅각의 비로 결정할 수 있다.

한편, 그림 2(b)에서 양 바퀴 축간 거리가 d 일 때 틸팅각과 좌우 차체의 슬라이딩 거리는 $\Delta s = d \tan \phi$ 의 관계를 갖는다. 따라서 좌우 틸팅 구동기의 직선 이송 거리는 다음과 같다.

$$u_{1ref} = \frac{1}{2}\Delta s = \frac{d}{2}\tan \phi_{ref}, u_{2ref} = -\frac{1}{2}\Delta s = -\frac{d}{2}\tan \phi_{ref} \quad (11)$$

위와 같은 방식을 따라 틸팅 운동을 제어하면 롤 각을 직접 피드백할 필요성이 사라진다. 밸런싱 로봇의 피치 축은 작은 제어오차도 자세 안정성에 직접적인 영향을 미치지만 틸팅 제어오차는 상대적으로 안정성에 큰 영향이 없다. 따라서 위 방식은 센서 비용 절감 측면에서 타당하다고 할 수 있다.

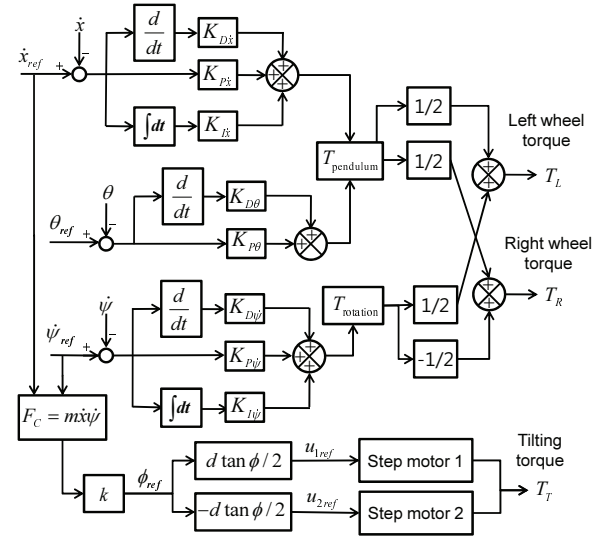


그림 7. 속도 및 자세제어 루프.

Fig. 7. Velocity and posture control loop.

2. 직진주행 실험

밸런싱 로봇을 제작할 때 내부 구성품들을 배치하는 공간적인 제약이 있기 때문에 차체의 무게중심을 정확히 바퀴 회전축 상에 놓이도록 하기는 어렵다. 본 연구에서 제작한 로봇은 무게중심이 바퀴 축에서 전방으로 $x_{CG} = 6.12\text{mm}$ 에 위치한다. 따라서 무게중심 오프셋에 의해 발생하는 중력 모멘트를 보상하기 위해서 $\theta_0 = -\tan(x_{CG}/z_{CG})$ 값을 초기 기준 피치각으로 설정한다.

먼저 그림 8은 전후진 직진주행 실험 결과이다. 이 때 로봇이 기준 속도 프로파일을 따라 전후진을 하는 동안 피치각은 기준 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그림과 같이 속도 응답 약간의 시간 지연과 오버슈트 현상을 보인다. 그리고 전방으로 편향된 무게중심 때문에 전후진 시에 속도가 수렴하는 양상이 서로 다르다. 전진, 후진에 대한 개인 설정 값을 다르게 조정하면 응답을 개선할 수 있다.

3. 선회주행 실험

그림 9는 로봇이 전방속도 2 m/sec, 30 deg/sec의 요 각속도를 가지고 선회주행을 하는 실험결과로써, 동일한 주행 조건에 대하여 로봇이 횡방향으로 틸팅 운동을 하는 경우와 하지 않는 경우를 비교한다. 두 경우 모두 주행 중에 요 각속도는

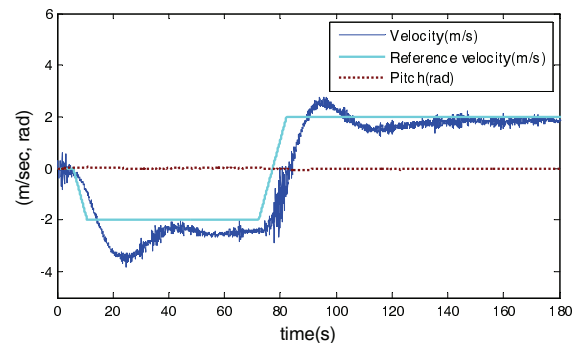


그림 8. 전후진 직진주행 실험결과.

Fig. 8. Straight driving experiment.

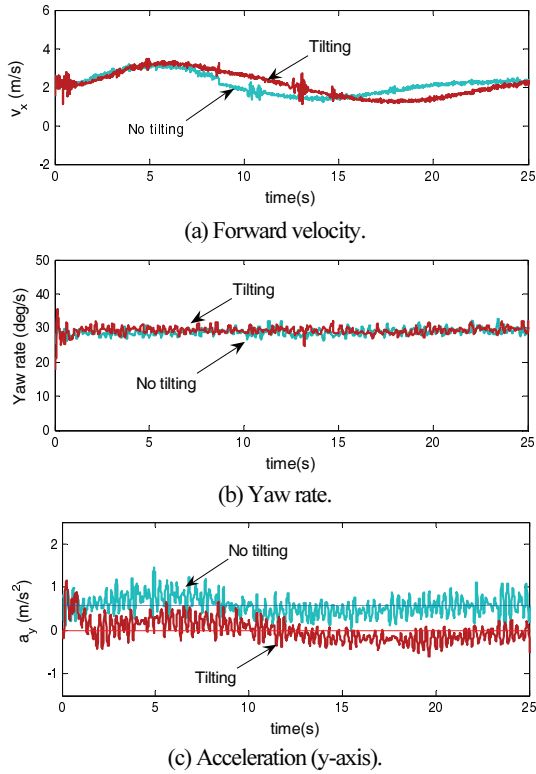


그림 9. 선회주행 실험결과.

Fig. 9. Turning driving motion experiment.

거의 일정한 값을 유지하고 있다. 전방속도가 서로 오차를 보이는 것은 피치각을 일정하게 유지하기 위해서 전방속도를 조절하기 때문이다.

한편, 그림 9(c)는 자이로 센서에서 측정된 횡방향 가속도를 비교한다. 로봇이 틸팅을 하지 않을 때는 운동 시에 발생하는 원심력 때문에 평균 0.6 m/sec² 정도의 가속도가 발생하였다. 반면, 틸팅 동작을 적용했을 때는 횡방향 가속도가 영 값 근처로 이동한다. 이 것은 틸팅에 의한 중력 모멘트 효과로 원심력을 적절하게 보상하고 있다는 것을 나타내며 로봇이 전복될 위험성이 그만큼 감소한다는 것을 의미한다. 그림 10은 선회주행 장면을 캡처한 그림으로써 로봇이 종방향 밸런싱과 횡방향 틸팅 동작을 동시에 하고 있다.

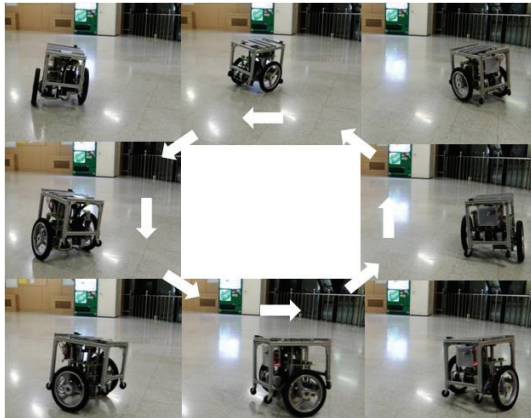


그림 10. 선회주행 장면.

Fig. 10. Turning driving motion (photo).

VI. 결론

본 연구에서는 기존 이륜 밸런싱 로봇에 횡방향 틸팅 기능을 첨가한 틸팅형 밸런싱 로봇을 제안하였다. 먼저 역학적 해석을 통해 차체가 좌우로 분리되는 슬라이딩형 틸팅 방식이 차체일체형 방식에 비해 구동력 절감 측면에서 유리함을 보였다. 다음에 수학적 모델링을 위해 틸팅형 밸런싱 로봇을 3차원 역진자로 가정하고 4자유도 운동방정식을 유도하였다. 그리고 제작된 로봇에 대한 속도/자세 제어기 설계와 주행실험을 통해 피치 밸런싱 성능과 틸팅 동작을 이용한 횡방향 원심력 보상 성능을 확인하였다. 향후 과제로는 평지 또는 경사지에서 틸팅 동작을 활용하여 밸런싱 로봇의 기동성과 선회 안정성을 향상시킬 수 있는 제어전략을 제시하고 그 타당성을 주행 실험을 통해 검증하고자 한다.

부록

1. 운동방정식 (6)과 (7)의 행렬 성분

$$a_{1\phi} = m_p l^2 \cos^2 \theta + I_1 \cos^2 \theta + I_3 \sin^2 \theta$$

$$a_{1\psi} = -(m_p l^2 + I_1 - I_3) \cos \phi \cos \theta \sin \theta$$

$$a_{2x} = m_p l \cos \theta$$

$$a_{2\theta} = I_2 + m_p l^2$$

$$a_{2\psi} = I_2 \sin \phi + m_p l^2 \sin \phi$$

$$a_{3x} = m_p l \sin \phi \cos \theta$$

$$a_{3\theta} = (m_p l^2 + I_2) \sin \phi$$

$$a_{3\psi} = \{m_p l^2 (1 - \cos^2 \phi \cos^2 \theta) + I_1 \cos^2 \phi \sin^2 \theta$$

$$+ I_2 \sin^2 \phi + I_3 \cos^2 \phi \cos^2 \theta + (2m_w d^2 + 2K + \frac{2d^2}{r^2} J)\}$$

$$a_{3\phi} = -(m_p l^2 + I_1 - I_3) \cos \phi \sin \theta \cos \theta$$

$$a_{4x} = m_p + 2m_w + \frac{2J}{r^2}$$

$$a_{4\theta} = m_p l \cos \theta$$

$$a_{4\psi} = m_p l \sin \phi \cos \theta$$

$$f_1 = f_{11} + f_{12} + f_{13}$$

$$f_2 = f_{21} + f_{22}$$

$$f_3 = f_{31} + f_{32} + f_{33} + f_{34}$$

$$f_4 = f_{41}$$

$$f_{11} = m_p l^2 \cos \theta \left(\frac{\dot{x}\dot{\psi}}{l} \cos \phi + 2\dot{\phi}\dot{\psi} \sin \theta + 2\dot{\theta}\dot{\psi} \cos \phi \cos \theta \right.$$

$$\left. + \dot{\psi}^2 \cos \phi \sin \phi \cos \theta \right)$$

$$f_{12} = \cos \theta \{-I_1 a_{p1} + (I_2 - I_3) \omega_{p2} \omega_{p3}\}$$

$$f_{13} = \sin \theta \{-I_3 a_{p3} + (I_1 - I_2) \omega_{p1} \omega_{p2}\}$$

$$f_{21} = -m_p l^2 \left(\frac{\dot{x}\dot{\psi}}{l} \sin \phi \sin \theta + \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta + 2\dot{\theta}\dot{\psi} \sin \phi \sin \theta \cos \theta \right.$$

$$\left. + 2\dot{\psi}^2 \sin^2 \phi \sin \theta \cos \theta - \dot{\psi}^2 \cos^2 \phi \sin \theta \cos \theta \right.$$

$$\left. + \dot{\phi}\dot{\psi} \cos \phi \cos 2\theta + \dot{\phi}\dot{\psi} \cos \phi \right)$$

$$f_{22} = -I_2 a_{p2} + (I_3 - I_1) \omega_{p1} \omega_{p3}$$

$$f_{31} = -m_p l \{ \dot{x}\dot{\psi} \sin \theta + \dot{\phi}^2 l \sin \phi \sin \theta \cos \theta + 2\dot{\theta}\dot{\psi} l \sin \theta \cos \theta$$

$$+ 2\dot{\psi}^2 (l \sin^3 \phi \sin \theta \cos \theta) + \dot{\phi}\dot{\psi} l \sin \phi \cos \phi (\cos 2\theta + 1)$$

$$+ \dot{\phi}\dot{\theta} (2l \cos \phi \sin^2 \theta) \}$$

$$f_{32} = -\cos \phi \sin \theta \{-I_1 a_{p1} + (I_2 - I_3) \omega_{p2} \omega_{p3}\}$$

$$\begin{aligned}
f_{33} &= \sin \phi \{-I_2 a_{p2} + (I_3 - I_1) \omega_{p1} \omega_{p3}\} \\
f_{34} &= \cos \phi \cos \theta \{-I_3 a_{p3} + (I_1 - I_2) \omega_{p1} \omega_{p2}\} \\
f_{41} &= -m_p \{\dot{\psi}^2 (-l \sin \theta \cos^2 \phi) + \dot{\phi} \dot{\psi} (2l \cos \phi \cos \theta) - \dot{\theta}^2 l \sin \theta\} \\
a_{p1} &= -\dot{\theta} \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \theta + \dot{\phi} \dot{\psi} \sin \phi \sin \theta \\
a_{p2} &= \dot{\phi} \dot{\psi} \cos \phi \\
a_{p3} &= -\dot{\theta} \dot{\psi} \cos \phi \sin \theta + \dot{\phi} \dot{\theta} \cos \theta - \dot{\phi} \dot{\psi} \sin \phi \cos \theta \\
\omega_{p1} &= \dot{\phi} \cos \theta - \dot{\psi} \cos \phi \sin \theta \\
\omega_{p2} &= \dot{\theta} - \dot{\psi} \sin \phi \\
\omega_{p3} &= \dot{\phi} \sin \theta + \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta \\
f_{1g} &= m_p g l \sin \phi \cos \theta \\
f_{2g} &= m_p g l \cos \phi \sin \theta
\end{aligned}$$

REFERENCES

- [1] F. Grasser, A. D'Arrigo, and S. Colombi, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107-114, Feb. 2002.
- [2] <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>, Apr. 2013.
- [3] <http://media.gm.com/>, May 2010.
- [4] http://www.toyota.com.hk/innovation/personal_mobility/winglet.aspx, Jul. 2013.
- [5] <http://www.segway.com/>, Apr. 2013.
- [6] Y. Ha and S. Yuta, "Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile inverse pendulum," *Robotics and Autonomous System*, vol. 17, pp. 65-80, Apr. 1996.
- [7] S. Kim and S. J. Kwon, "SDRE based nonlinear optimal control of a two-wheeled balancing robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 1037-1043, Jul. 2011.
- [8] C. Huang and W. Wang, "Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2988-3001, Jul. 2011.
- [9] H. W. Kim and S. Jung, "Experimental studies of controller design for a car-like balancing robot with a variable mass," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 4, pp. 469-475, Jul. 2010.
- [10] T. Takei, O. Matsumoto, and K. Komoriya, "Simultaneous estimation of slope angle and handling force when getting on and off a human-riding wheeled inverted pendulum vehicle," *Proc. of 2009 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4553-4558, Oct. 2009.
- [11] S. Oh, N. Hata and Y. Hori, "Integrated motion control of a wheelchair in the longitudinal, lateral, and pitch directions," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 4, pp. 1855-1862, Apr. 2008.
- [12] J.-H. Um, K.-Y. Eum, I.-H. Yeo, and Y.-H. You, "Evaluation of tilting trains speed in conventional railways curves considering passenger's comfort in transition area," *Journal of the Korean Society for Railway (in Korean)*, vol. 7, no. 4, pp. 360-366, Dec. 2004.
- [13] J. A. Smith, I. Sharf, and M. Trentini, "PAW: A hybrid wheeled-leg robot," *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4043-4048, May 2006.
- [14] M. Alarfa and G. Kantor, "Centrifugal force compensation of a two-wheeled balancing robot," *Proc. of Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 2333-2338, Dec. 2010.
- [15] J. Yu, Y. Park, S. Kim, and S. J. Kwon, "Development of an omni-directional self-balancing robot wheelchair," *Journal of Korea Robotics Society (in Korean)*, vol. 8, no. 4, pp. 229-237.
- [16] S. Kim, J. Seo, and S. J. Kwon, "Development of a two-wheeled mobile tilting & balancing (MTB) robot," *Proc. of 2011 Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, Oct. 2011.
- [17] J.-W. Joh and G.-T. Park, "Hardware design methods for segway type 2-wheeled mobile robots," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea (in Korean)*, vol. 46, no. 5, pp. 322-328, Sep. 2009.
- [18] J. Zhao and M. W. Spong, "Hybrid control for global stabilization of the cart-pendulum system," *Automatica*, vol. 37, no. 12, pp. 1941-1951, Dec. 2001.
- [19] T. R. Kane and D. A. Levinson, *Dynamics: Theory and Applications*, McGraw-Hill, 1985.



김 상 태

2008년 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 공학사. 2010년 동 대학원 공학석사. 2010년~현재 동 대학원 박사과정 재학 중. 관심분야는 밸런싱 모바일 로봇 설계, 비선형 최적제어.



서 정 민

2011년 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 공학사. 2013년 동 대학원 공학석사. 2013년~현재 현대자동차 연구개발본부 사시기술센터 연구원. 관심분야는 이동로봇 기구설계 및 제어.



권 상 주

1989년 서울대학교 조선공학과 공학사. 1991년 POSTECH(포항공대) 기계공학과 공학석사. 2002년 POSTECH(포항공대) 기계공학과 공학박사. 1991년~1997년 국방과학연구소 연구원. 2003년~2004년 한국과학기술연구원, 한국생산기술연구원 선임연구원. 2010년~2011년 미국 University of Washington at Seattle, Visiting scholar. 2004년~현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(부교수). 관심분야는 Balancing robot design, Optimal planning, control, and filtering.