전방향 셀프-밸런싱 로봇휠체어 개발

Development of a Omni-directional Self-Balancing Robot Wheelchair

유 재 림¹, 박 윤 수¹, 김 상 태¹, 권 상 주[†]

Jaerim Yu¹, Yunsu Park¹, Sangtae Kim¹, SangJoo Kwon[†]

Abstract In this paper, we report a self-balancing robot wheelchair which has the capability of keeping upright posture regardless of the terrain inclination in terms of the three dimensional balancing motion. It has the mobility of five degrees of freedom, where pitching, yawing, and forward motions are generated by the two-wheeled inverted pendulum mechanism and the rolling and vertical motions are implemented by the movement of the tilting mechanism. Several design considerations are suggested for the sliding type vehicle body, wheel actuator module, tilting actuator module, power and control system, and the riding module.

Keywords: robot wheelchair, balancing robot, tilting mechanism, inverted pendulum robot, posture control

1. 서 론

최근 장애인들의 경제 활동이 활발해지고 노약자 인구 비중이 증가함에 따라 도심, 마트, 사무실 등 혼잡한 환경에서 간편하게 사용할 수 있는 개인용 이동수단에 대한 수요가 높아지고 있다. 미래 사회에서 전동휠체어는 하반신 장애인이나 노약자들의 삶의 질 향상을 위한 필수적인 아이템이라고 할 수 있다. 이에 따라 기존 전동휠체어의 기능적 한계를 넘어 좌석높이 상승, 계단 오르내리기, 자동 밸런싱 등의 편의장치를 갖춘 로봇휠체어가 많은 관심을 받으며, 현재 다양한 종류의 로봇휠체어가 개발되고 있고 일부는 시판 중에 있다^[1-6].

현재까지 개발된 로봇휠체어 중에서 Ibot4000^[1]은 이륜 직립주행, 가변 메커니즘을 이용한 계단 오르내리기, 휠체

어 높이조절 기능을 포함하는 대표적인 로봇휠체어이다. Galileo 휠체어^[2]는 바퀴와 캐터필러의 조합으로 평지 주행과 계단 오르기를 병행할 수 있으며 다관절 기구를 이용하여 탑승자 높이 조절이 가능하다. Genny^[3]는 셀프-밸런싱 기능에 초점을 둔 휠체어로서 Segway^[4] 플랫폼에 기반하고 있으며 상용 제품으로써 높은 수준의 완성도를 보여주고 있다. 국내에서도 이족보행 메커니즘을 적용하여 계단을 오르내릴 수 있는 로봇휠체어^[5], 변신형 다기능 휠체어 로봇^[6] 등이 개발되었다.

로봇휠체어가 상업적 성공을 거두기 위해서는 무엇보다 메커니즘을 단순화하여 저가의 제작비를 실현해야 한다. 예를 들어 RT-Mover^[7]는 사족 보행과 차륜구동 시스템을 이용하여 요철 지형에서 주행이 가능하지만 복잡한 시스템과 차체 크기 때문에 실용화 가능성이 크지 않다. Ibot4000^[1]이나 Genny^[3]는 기술적 완성도가 뛰어난 로봇휠체어이지만 높은 판매가 때문에 아직까지 활발한 보급이 이루어지지 못하고 있다.

이륜 밸런싱 휠체어는 소형경량화가 가능하기 때문에 도심지뿐만 아니라 사무실이나 마트와 같은 통행로가 좁은 실내 환경에서도 주행하기에 유리하다. 또한 구동 메

Received : Sep. 11. 2013; Reviewed : Oct. 7. 2013; Accepted : Oct. 24. 2013

※ This project was funded by the National Research Foundation of Korea grant (NRF-2012R1A1B3003886).

※ 본 논문의 일부 내용이 제8회 한국로봇종합학술대회(2013. 5. 30~6.1)에서 발표되었음.

¹ School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University ({jaerim_yu, magingz, kimoney}@kau.ac.kr).

[†] Corresponding author: School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Hwajeon-Dong, Deogyang-Gu, Goyang-city Korea (sjkwon@kau.ac.kr).

커니즘이 단순하기 때문에 제작비를 크게 낮출 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 이륜 밸런싱 메커니즘은 동역학적으로 역진자 특성을 갖기 때문에 근본적인 안정성 문제를 포함하고 있다. 로봇휠체어의 보급이 확대되기 위해서는 기능적 혁신과 더불어 무엇보다 주행 안전성이 확보되어야 한다. 일반 전동휠체어의 경우, 최근 판매 대수가 증가함에 따라 비평탄 지형 등에서 다양한 전복사고 사례가 보고되고 있다^[8].

기존에 상용화된 Ibot4000, Segway, Genny 등 셀프-밸런싱 기능을 갖는 로봇휠체어들은 역진자 제어기술을 바탕으로 안정적인 종방향 피치각 자세제어 성능을 구현하였다. 그러나 갑작스런 선회 동작이 발생하면 전복 사고가 일어날 수 있으며, 요철 도로나 경사지에서는 수시로 양 바퀴의 높이 차가 변하기 때문에 횡방향으로 롤 안정성 문제가 발생한다. 따라서 로봇휠체어가 평지, 경사지, 요철 등 지면 상태에 무관하게 항상 안정된 자세를 유지하고 급선회 시에 전복을 방지하기 위해서는 3차원적인 자세제어가 가능한 전방향(omni-directional) 밸런싱 로봇휠체어 개발이 요구된다.

본 논문에서는 기존 역진자형 밸런싱 로봇에 횡방향 틸팅 기구를 도입한 틸팅형 로봇휠체어를 제시한다. 틸팅 동작을 활용하면 휠체어가 경사지를 주행할 때에도 탑승자가 항상 직립자세를 유지할 수 있으며, 급선회 상황에서는 틸팅 각도에 의한 중력보상 효과로 로봇이 전복되는 것을 방지할 수 있다.

먼저 2장에서는 틸팅형 밸런싱 로봇휠체어의 설계 개념을 설명하며, 좌우 차체가 상호 슬라이딩하는 방식의 분리형 차체를 제시한다. 3장에서는 역학적 해석에 기반하여 휠 구동부 및 틸팅 구동부 설계 문제를 다룬다. 4장에서는 탑승 모듈 설계, 5장에서는 시스템 통합과 주행 실험 결과를 소개하며, 6장에서 결론을 맺는다.

2. 밸런싱 로봇휠체어 차체 설계

2.1 틸팅형 전방향 밸런싱 플랫폼

본 논문에서 제시하는 전방향 밸런싱 로봇휠체어 플랫폼은 이륜 역진자 기구와 틸팅 기구로 구성되어 있으며 총 5자유도 운동을 한다. Fig. 1에서 전후방 직진, 피치, 요

Fig. 1. Mobility of the balancing robot wheelchair platform

Fig. 2. Structure of the robot wheelchair platform

운동은 기존 밸런싱 로봇과 같이 양 바퀴 구동에 따른 역진자 운동에 의하여 발생하며, 틸팅 기구의 동작에 의해 롤 운동과 수직 운동이 추가된다. 결과적으로 횡방향 롤 운동이 추가됨으로써 모든 운동 방향에 대한 3차원적인 자세제어가 가능하기 때문에 지형 및 지면 경사각에 무관하게 탑승자(플랫폼)가 원하는 자세를 유지할 수 있다. 플랫폼의 수직 상하운동은 탑승자의 좌석을 임의 높이로 조절할 수 있는 장점을 갖는다.

밸런싱 로봇은 무게중심이 바퀴 축보다 높은 곳에 위치

하는 역진자 특성을 갖기 때문에 근원적인 불안정성을 내포하고 있지만 제자리 선회가 가능하고 사륜 주행기기와는 달리 경사로 주행 시에 탑승자의 자세를 직립으로 유지할 수 있다. 또한 Fig. 2(a)와 역진자 제어에 의해 피치 방향 밸런싱을 유지하면서, 양 바퀴 속도 차를 이용한 요 운동에 의해 주행 방향 변경 또는 선회 주행을 할 수 있다.

틸팅형 밸런싱 휠체어는 Fig. 2(b)와 같이 차체가 좌우 블록으로 분리되어 상호 슬라이딩하는 형태를 갖는다. 좌우 차체 블록에 장착된 볼 나사가 모터 구동에 의해 서로 반대 방향으로 움직이면 틸팅 동작에 의해 롤 운동이 발생하고, 서로 같은 방향으로 움직이면 플랫폼의 높이가 상승 또는 하강한다. 이와 같이 이륜 밸런싱 플랫폼에 틸팅 기법을 적용하면 요철 지형이나 경사지에서 주행할 때 횡방향 모션을 이용하여 직립 자세를 유지할 수 있다.

본 연구를 통해 개발된 로봇휠체어의 주요 제원은 Table 1과 같다. 휠체어의 차폭은 탑승자가 불편을 느끼지 않는 좌석의 폭이 최소 400 mm 이상이라는 점을 고려하여 결정하였다[9]. 주행기에서 주행 속도와 등판 성능은 서로 상충 관계에 있으며, 동일한 휠 구동기에 대하여 감속기어 비에 따라 최대 속도와 최대 등판각이 결정된다.

Table 1. Specifications of the robot wheelchair

Width(W) x Height(H) x Depth(D)	593 x 522 x 450 mm
Weight(w/o riding module)	45 kg
Max. driving speed	10 km/hr
Max. pitch angle	+/- 15 deg
Max. terrain slope	10 deg
Max. payload	100 kg
Max. tilting angle	+/- 15 deg
Max. tilting speed	2.5 deg/sec

2.2 좌우 분리형 차체

개발된 로봇휠체어의 차체는 휠 구동기, 틸팅 구동기, 볼 나사(ball screw)를 포함하는 좌우 차체 블록과 탑승 모듈이 장착되는 상부 플랫폼으로 구성된다. 볼 나사는 토크 전달 효율이 우수하고 가반 하중이 크다는 장점을 갖는다. Fig. 2(b)에서 좌우 볼 나사를 구동하는 두 개의 틸팅 구동기는 상부 플랫폼에 장착되며 각각 벨트-폴리를 통해

각 볼 나사의 상단과 연결된다.

그리고 볼 나사의 하단은 블록 내부에서 가이드의 안내에 따라 상하로 움직이는 중간 플레이트에 연결된다. 중간 플레이트는 좌우 블록을 수평 방향으로 연결하여 차체의 강성을 유지시키는 역할을 한다.

좌우 차체 블록의 하판에는 양 바퀴의 휠 모터가 장착되며 모터의 구동력이 벨트-폴리를 통해 바퀴에 전달된다. 한편 휠 모터를 좌우 비대칭으로 장착하여 바퀴 사이의 간격을 최소화시킴으로써 휠체어 차폭에 대한 설계 요구조건을 만족시킬 수 있으며 전체 무게중심이 바퀴 축 상에 놓이도록 조절할 수 있다.

휠체어가 주행하는 중에 지면 경사각에 따라 목표 틸팅 각이 주어지면 기구학적 관계식에 따라 좌우 볼 나사의 이동거리가 결정된다. 틸팅 모터의 구동 토크에 의해 볼 나사가 회전하면 좌우 블록이 리니어 부시와 가이드의 안내에 따라 상하로 움직이게 된다.

2.3 바퀴 축과 차체의 강도 해석

이륜형 밸런싱로봇에서 바퀴 축은 구조적으로 가장 취약한 부분에 속한다. 바퀴 축이 차체와 탑승자의 하중을 충분히 지탱하기 위해서는 재료의 허용 응력을 고려하여 축 지름과 길이를 결정해야 한다. 우선 주어진 차폭에 적합한 좌우 바퀴 축의 길이는 각각 190 mm로 결정되었다. 바퀴 축 재료의 물리적 성질은 Table 2와 같이 주어진다. 이 때 바퀴 축에 작용하는 등가 굽힘 모멘트와 축 지름은 다음과 같은 관계식을 갖는다^[10].

$$M_e = \frac{1}{2}(M + \sqrt{M^2 + T^2}) = \sigma \times Z = \sigma \frac{\pi}{32} d^3 \quad (1)$$

한 등가 비틀림 모멘트와 축 지름과의 관계는 다음과 같다.

$$T_e = \sqrt{M^2 + T^2} = t \times Z_p = t \times 2Z = t \frac{\pi}{16} d^3 \quad (2)$$

위 식에서 Z 는 단면계수, Z_p 는 극관성 모멘트이다. 따라서 바퀴 축에 요구되는 최소 지름은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M_e}{\pi\sigma}} \quad \text{or} \quad d = \sqrt[3]{\frac{16T_e}{\pi t}} \quad (3)$$

Table 2에 나타난 재료의 물성을 위 식에 적용하면, 등가 굽힘 모멘트를 고려한 경우에는 15 mm 이상의 축 지름이 요구되고 등가 비틀림 모멘트를 고려한 경우에는 11 mm 이상이 요구된다. 여기에 안전계수를 고려하여 실제 축 지름은 19 mm로 결정하였다.

개발된 휠체어의 차체는 여러 개의 세로 기둥과 가로 판들로 구성되며 차체가 좌우로 분리되어 서로 슬라이딩하는 구조이기 때문에 강성(stiffness) 유지 측면에서는 분리한 형상이다. 따라서 전체 휠체어 플랫폼에 대한 응력(stress) 해석을 통하여 강도(strength)가 취약한 부분을 확인하는 작업이 필요하다. Fig. 3은 몸무게 100 kg인 사람이 탑승했을 때, 휠체어가 최대 틸팅각으로 기울어져 구조적으로 가장 취약한 상황에서 차체에 발생하는 응력 분포를 나타낸다. 예상된 바와 같이 바퀴 축과 그 주변부에서 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 휠체어 제작에 사용된 5T 알루미늄(Al 7075)의 경우, 최대 41 Mpa의 응력이 발

생하였다. 알루미늄 판의 허용 응력이 240 Mpa이므로 안전계수를 고려해도 차체의 강도는 충분하다고 할 수 있다.

3. 구동부 설계

3.1 휠 구동부 설계

Table 1에 제시된 로봇휠체어의 주행속도와 등판각은 전동휠체어에 대한 국제표준기구의 규격(ISO7176-6)을 참고로 결정된 것이다. 주어진 목표 성능을 달성하기 위해서는 바퀴의 요구 토크를 계산하고 이를 만족시키는 구동부를 선정해야 한다. 양 바퀴 구동부는 휠 모터와 감속기어 그리고 바퀴 축으로의 동력전달을 위한 벨트-폴리 기구로 구성된다. 휠체어 바퀴는 직경이 크면 주행속도는 증가하지만, 지면에 전달되는 힘이 감소하여 경사지 등판 능력이 떨어지므로 주어진 스펙에 대하여 적절한 크기의 바퀴를 선정해야 한다.

Table 3에 나타난 휠체어의 성능 파라미터에 대하여 바퀴 구동부의 필요 등속토크와 필요 가속토크는 다음 관계식들을 이용하여 계산할 수 있다^[12].

$$J = \frac{WD^2}{8} \quad : \text{부하 관성모멘트}$$

$$T_m = \frac{WD}{4} (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \quad : \text{필요 등속토크} \quad (4)$$

$$T_a = \frac{2\pi J}{gt_a} \times RPS + T_m \quad : \text{필요 가속토크}$$

여기서 g 는 중력가속도이다. Table 3에 주어진 값들을 위 식에 대입하여 경사지에서의 필요 가속토크를 계산한 후, 안전계수 1.2를 곱하면 바퀴 구동부에 요구되는 토크는 46.7 Nm이다. 따라서 휠 모터의 정격 토크와 감속기어의 기어비 및 벨트-폴리에서의 감속비를 곱한 값이 요구 토크 이상이 되도록 휠 구동부를 구성한다.

Table 2. Wheel axis material properties (steel SCM-430)^[11]

σ	Allowable bending stress	294 Mpa
t	Allowable torsional stress	205 Mpa
M	Bending moment	50 Nm
T	Torsional moment	22 Nm

(Note) Length of the wheel axis: 190 mm.

Fig. 3. Stress distribution of the body (ANSYS)

Table 3. Parameters for wheel actuator selection

W	Total weight	150 kgf
D	Wheel diameter	16 in (406.4mm)
RPS	Revolution per second	2.1757
μ	Ground friction coeff.	0.1
t_a	Acceleration time	10 sec
α	Terrain slope angle	10 deg

3.2 틸팅 구동부 설계

틸팅 구동부는 좌우로 분리된 차체가 상호 슬라이딩하는 역할을 담당하며 좌우 차체 각각이 틸팅 구동기로서 스텝 모터, 볼 나사(ball screw), 동력전달을 위한 벨트-풀리 기구를 포함한다. Table 1의 틸팅속도 스펙은 횡방향 롤링 속도가 5 deg/sec를 초과하면 탑승자가 불편함을 느낀다는 점을 고려하여 결정된 것이다^[13].

볼 나사는 차체와 탑승자의 하중을 지탱하면서 틸팅 구동기의 힘을 차체에 전달하는 역할을 한다. 볼 나사의 제원은 길이, 직경, 및 리드(lead) 값으로 결정된다. 먼저 길이는 주어진 차폭에 대하여 최대 틸팅각을 산출할 수 있는 값으로 결정한다. 리드는 볼 나사가 1회전할 때 이동하는 거리로서 볼 나사의 이동 속도를 결정한다. 기본적으로 볼 나사의 리드는 모터의 정격 RPM에 대하여 최대 틸팅 속도 스펙을 만족시켜야 한다. 그리고 볼 나사의 직경

은 부하를 이동시키는데 필요한 구동기 힘을 바탕으로 결정된다.

로봇휠체어가 크게 세 부분의 강체로 구성된다고 가정하면 차체의 좌우 블록과 상부 플랫폼에 대한 자유물체도를 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 각 파라미터 값들은 Table 4와 같다. 바퀴의 두께는 무시하며, 각 파트의 무게 중심은 중앙에 있고, 최대 슬라이딩 거리(s)의 중간 지점에 반력 모멘트의 합이 작용한다고 가정한다. 이 때 각각의 강체에 대하여 평형 방정식을 적용한 후에 정리하면, 볼 나사와 블록의 연결점인 A, B에서 볼 나사의 길이 방향으로 작용하는 정역학적 하중은 결론적으로 다음 식과 같다.

$$F_A = -\frac{1}{w} \left\{ 2m_w r + 2m_b(r + h_b) + m_d(r + h_d + l_b + \frac{s}{2}) \right\} g \sin \phi - \frac{1}{2} m_d g \cos \phi \quad (5)$$

$$F_B = \frac{1}{w} \left\{ 2m_w r + 2m_b(r + h_b) + m_d(r + h_d + l_b + \frac{s}{2}) \right\} g \sin \phi - \frac{1}{2} m_d g \cos \phi \quad (6)$$

이제 볼 나사에 작용하는 하중에 대하여 나사를 회전시키기 위하여 요구되는 구동기 힘을 계산한다. 나사 산에 작용하는 힘은 Fig. 5와 같이 근사할 수 있다. 나사를 따라 회전하는 블록(볼 너트)에 하중 Q가 작용할 때 블록이 나사 산을 따라 상승하기 위해서는 구동기 힘은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\sum F_x > \mu \sum F_y \rightarrow P \cos \theta - Q \sin \theta > \mu(Q \cos \theta + P \sin \theta) \quad (7)$$

따라서 구동기에 요구되는 힘 P와 토크는 다음 식으로 결정된다.

$$P > Q \left(\frac{p + \mu \pi d}{\pi d - \mu p} \right) \rightarrow \tau = P \frac{d}{2} \quad (8)$$

위 식에 따르면 구동기에 요구되는 토크 값은 볼 나사의 지름이 클수록, 리드가 작을수록 작아지는 경향을 갖

Fig. 4. Free body diagram of the wheelchair platform

Table 4. robot wheelchair parameters

Width	w	0.6 m
Wheel mass	m_w	2 kg
Wheel radius	R	16 in
Block mass	M_b	20 kg
C.G. of block	h_b	0.135 m
Passenger mass	m_d	100 kg
Dummy height	h_d	0.2 m
Block height	l_b	0.27 m
Max. sliding distance	s	0.17 m
Tilting angle	ϕ	15 deg

Fig. 5 Applied forces at ball screw

는다. 그러나 지름이 너무 크면 볼스크류의 질량관성모멘트가 증가하고, 리드가 작으면 나사의 이동 속도가 감소하는 단점이 있다. 본 연구에서는 볼 나사에 작용하는 최대 하중을 (5)-(6)식에 의거하여 산출하였고, 틸팅 속도 스펙을 만족시키는 볼 나사의 제원을 길이 140 mm, 직경 32 mm, 리드 5 mm로 결정하였다.

4. 탑승 모듈 설계

탑승 모듈은 Fig. 6과 같이 좌석, 조종장치, 캐스터로 구성되며 탑승자가 착석하여 휠체어를 조종하는데 편리한 인터페이스 환경을 제공한다.

일반적으로 휠체어에 사용되는 스티어링 및 속도 조종 장치는 Fig. 7과 같이 세가지 타입으로 구분할 수 있다. 먼저 일반 전동휠체어에 많이 사용되는 스틱 형은 크기가 작아 공간 활용성은 높지만 직관적인 조종을 하기에는 부적합하다. 스티어링 핸들은 보다 직관적인 선회 조종이 가능하지만 공간을 많이 차지하고 탑승자가 승하차 하기에 불편하다. T-bar 형은 탑승자에게 심리적 안정감을 준다는 장점이 있으나 개발에 소요되는 시간이 상대적으로 길어진다.

또한 캐스터는 로봇휠체어가 밸런싱 동작 불능 상태에 빠졌을 때 전복 사고를 방지하기 위한 중요한 구성 요소이다. 그러나 지면으로부터 캐스터 높이가 너무 낮으면 피치 운동 범위가 제한되어 가속 성능과 등판 성능을 제대로 발휘할 수 없게 된다. 따라서 지면과의 간섭 없이 Table 1에 제시된 허용 피치각과 허용 틸팅각을 만족시키는 적절한 높이의 캐스터를 장착해야 한다.

Fig. 8에서 휠체어에 설정된 좌표계가 임의의 피치각과 틸팅각으로 회전하면 특정 포인트의 새로운 좌표값은 다

Fig. 6. Robot wheelchair riding module

Fig. 7. Wheelchair control types

Fig. 8. Caster position

음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x \cos \theta + y \sin \phi \sin \theta + z \cos \phi \sin \theta \\ y \cos \phi + z \sin \phi \\ -x \sin \theta - y \sin \phi \cos \theta + z \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 휠체어의 최대 허용 피치각과 틸팅각에 대하여 캐스터가 지면에 접촉하지 않기 위해서는 다음 식을 만족해야 한다.

$$z' = -x \sin \theta - y \sin \phi \cos \theta + z \cos \phi \cos \theta > 0 \quad (10)$$

제작된 로봇휠체어는 캐스터 위치가 좌표계 원점으로부터 $x = 400 \text{ mm}$, $y = 295 \text{ mm}$ 에 위치한다. 따라서 Table 1에 제시된 허용 피치각과 틸팅각에 대한 캐스터의 높이는 지면으로부터 182.3mm 이상이 되어야 한다.

5. 시스템 통합 및 주행 실험

5.1 차체 조립

로봇휠체어 플랫폼은 Fig. 9와 같은 순서를 따라 조립된다. 먼저 좌우 블록 하판에 휠 모터와 바퀴를 장착한다. 다음 좌우 블록에 리니어 부시, 볼스크류, 수직 프레임을 설치하고 각각에 상판을 연결한다. 마지막으로 좌우 볼스크류와 리니어 부시를 탑승 모듈이 장착되는 상부 플랫폼에 연결한다. 상부 플랫폼에는 틸팅 구동기가 장착되며 벨트-풀리를 통해 볼스크류와 연결된다.

Fig. 10은 완성된 전방향 밸런싱 휠체어 플랫폼으로서 탑승 모듈이 장착되기 전의 모습이다. 무게가 많이 나가는 배터리는 블록 하판 아래에 장착하며 모터 드라이버, PC, 자이로 센서 등은 차체 블록의 빈 공간에 적절히 배치하여 전체 무게중심이 바퀴 축을 포함하는 수직면 상에 놓이도록 조절한다. 한편, 전체 무게중심은 탑승 모듈을 제외한 경우 바퀴 축으로부터의 수직 $z = 85 \text{ mm}$ 위치에 있으며, 탑승모듈에 80 kg의 사람이 탑승했을 경우에 대략

Fig. 9. Wheelchair assembly procedure

Fig. 10. Balancing wheelchair platform

$z = 426 \text{ mm}$ 부근에 위치한다.

5.2 제어 시스템 구성

로봇휠체어의 전원 및 인터페이스 구성은 Fig. 11과 같다. 주 제어기로는 미니 PC를 사용하였으며 Windows OS 환경에서 C++ 기반으로 제어 프로그램을 개발하였다. 휠 구동기는 400 Watt 급 BLDC 모터로서 모터 드라이버는 PC와 USB 통신을 통해 구동 명령을 전달 받는다. 틸팅 구동기로는 200 Watt 급 스텝 모터를 사용하였고 드라이버와 PC는 USB 통신을 통해 데이터를 송수신한다. 탑승자는 핸들을 통해 속도 명령과 스티어링 명령을 주 제어기로 전달한다.

전방향 밸런싱 휠체어의 주행 실험을 위해 구성한 속도 및 자세제어 루프는 Fig. 12와 같다. 요 각속도 명령은 탑승 모듈의 스티어링 핸들에서 발생하며, 요 각속도 피드백 값은 양 바퀴 속도 차를 이용하여 계산한다. 피치 각과 롤 각의 피드백은 자이로 측정 값을 이용하여, 기준 명령은 항상 영으로 입력하여 지면 경사각에 무관하게 탑승자

Fig. 11. Power system and interface

Fig. 12. Velocity and posture control loop

의 직립자세를 유지시킨다.

5.3 주행 실험

밸런싱 로봇휠체어는 일반적인 전동휠체어에 비해 소형 경량으로 설계할 수 있고 민첩한 선회 동작이 가능하다는 장점이 있는 반면, 피치 방향으로 역진자 운동 특성을 갖기 때문에 안정적인 자세제어 시스템을 확보하는 것이 가장 기본적인 과제이다. 본 연구에서는 다양한 실내외 주행 실험을 통해 전방향 밸런싱 기능을 구현하고 안정적인 주행 성능을 확보하는 것을 목표로 하였다. Fig. 13에 보인 바와 같이 피치 밸런싱을 유지한 상태에서 직진 주행, 제자리 틸팅, 주행 방향 전환이 원활하게 이루어지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 13(d)는 경사지에서 전방향 밸런싱 동작에 의해 탑승자가 직립 자세를 유지하며 주행하는 것을 보여준다.

한편, 자세제어 성능은 자이로 센서의 분해능과 대역폭에 크게 의존한다. 실험에 사용된 자이로 측정값의 갱신 주기는 50 msec이며 휠 모터의 제어입력 주기는 15 msec이다. 경험적으로 불규칙한 지면에서 보다 강인한 자세제어 성능을 갖추기 위해서는 제어입력의 갱신 주기와 자이로의 샘플링 주기를 수 msec 수준으로 낮추어야 한다. 이를 위해서는 제어용 컴퓨터와 모터 드라이버 간의 통신 속도 개선, 필터링 기법을 적용한 센서 피드백 주기 개선 등이 필요하다.

(a) Straight motion

(b) Tilting motion

(c) Steering motion

(d) Omni-directional balancing motion on a slope

Fig. 13. Driving experiments

6. 결 론

밸런싱 로봇휠체어는 소형경량의 차체, 제자리 선회 같은 장점 때문에 실내외의 혼잡 지역에서 장애인 및 노약자들의 개인용 주행기기로 활용하기에 적합하다. 이 논문에서는 횡방향 틸팅 기구를 도입한 전방향 밸런싱 로봇휠체어 개발에 관한 내용을 다루었다. 틸팅 동작을 구현하기 위하여 좌우 블록이 상호 슬라이딩하는 형태의 분리형 차체를 설계하였으며, 역학적 분석에 기반하여 바퀴 축, 볼 나사, 휠 구동부, 틸팅 구동부 등 차체 구성 요소의 재료들을 결정하였다. 또한 시스템 통합 및 주행 실험을 통

하여 밸런싱 로봇휠체어로서의 기본적인 성능을 확인하였다. 향후 과제로는 자세제어 성능 향상을 위한 센서융합 기법 적용, 사용자 편의성 향상을 위한 주차장치 및 스마트 탑승모듈 개발, 그리고 주행 안전성 향상을 위한 장애물 회피 기능, 자율주행 시스템 개발 등이 있다.

References

- [1] <http://www.ibotnow.com> (Ibot 4000).
- [2] <http://www.galileo-mobility.com> (Galileo).
- [3] <http://www.gennymobility.com> (Genny).
- [4] <http://www.segway.com> (Segway personal transporter).
- [5] Y.-B. Bang, C.-H. Lee, J.-H. Yoo, K.-M. Lee and I.-S. Kim, "Two-Legged Stair-Climbing Wheelchair and Its Stair Dimension Measurement Using Distance Sensors", Proc. of the 2011 11th Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS), Oct. 2011, Gyeonggi-do, Korea.
- [6] H. S. Kim, H. S. Song, S. Jung, "Design and Control of a Wheelchair Robot for Handicapped or Elderly Persons," Journal of Institute of Control, Robotics, and Systems, Vol. 17, No. pp. 668-673, Jul., 2011.
- [7] S. Nakajima, "Concept of a Novel Four-wheel-type Mobile Robot for Rough Terrain, RT-Mover", Proc. of the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Oct., 2009, St. Louis, USA.
- [8] J. Y. Kong, "Survey on the safety accidents of the disabled transportation aids", Journal of Special Education & Rehabilitation Science, Vol. 52, No. 2, pp. 1~16, 2013.
- [9] K. T. Jeong et al., "Anthropometric Evaluation and Design of Wheelchair", Proc. of 2010 Spring annual meeting, Korean ergonomics society, pp. 128-131, 2010. 5.
- [10] S. M. Jung, D. H. Han, I. B. Jang, Standard Mechanical Design (Book), Dongmyung-sa, 2010.
- [11] J. P. Hong, S. B. Lee, Design of Machine Elements (Book), Kyobo-munko, 2008.
- [12] 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, Vol. 46, No. 5, pp. 322-328, Sep., 2009.
- [13] J.-H. Um et al., "Evaluation of Tilting Trains Speed in Conventional Railways Curves Considering Passenger's Comfort in Transition Area", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 7, No. 4, pp. 360-366, Dec. 2004.

유재림

2013. 8 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학사)

2013. 9~현재 한국항공대학교 대학원 항공우주기계공학과 석사과정

관심분야: 로봇기구 설계, 밸런싱로봇 자세제어, 모바일 로봇 자율주행

박윤수

2013. 8 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학사)

관심분야: 로봇기구 설계, 센서 인터페이스

김상태

2008. 2 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학사)

2010. 2 동 대학원(공학석사)

2010. 3~현재 동 대학원 박사과정

관심분야: 로봇기구 설계, 비선형 최적제어 및 필터링

권상주

1989 서울대학교 조선공학과 (공학사)

1991 POSTECH(포항공대) 대학원 (공학석사)

2002 POSTECH(포항공대) 대학원 (공학박사)

1991~1997 국방과학연구소 연구원

2003~2004 한국과학기술연구원, 한국생산기술연구원 선임연구원

2010 Univ. of Washington at Seattle, Visiting scholar

2004~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부

관심분야: Balancing robot design, Optimal planning, control, and filtering