

## 인간형 로봇의 임팩트 모델과 공기역학을 고려한 축구공의 궤적 계획

### Trajectory Planning of a Soccer Ball Considering Impact Model of Humanoid and Aerodynamics

최재연\*, 소병록, 이병주  
(Jae Yeon Choi, Byung Rok So, and Byung-Ju Yi)

**Abstract :** Usual human gait can be modeled as continual impact phenomenon that happens due to the topological change of the kinematic structure of the two feet. The human being adapts his own control algorithm to minimize the ill effect due to the collision with the environment. In order to operate a Humanoid robot like the human being, it is necessary to understand the physics of the impact and to derive an analytical model of the impact. In this paper, specially, we focus on impact analysis of the kicking motion in playing soccer. At the instant of impact, the external impulse exerted on the ball by the foot is an important property. Initially, we introduce the complete external impulse model of the lower-extremity of the human body and analyze the external impulses for several kicking postures of the lower-extremity. Secondly, a trajectory-planning algorithm of a ball, in which the initial velocity and the launch angle of the ball are calculated for a desired trajectory of the ball, will be introduced. The aerodynamic effect such as drag force and lift force is also considered. We carry out numerical simulation and experimentation to verify the effectiveness of the proposed analytical methodology.

**Keywords :** external impulse, impact, soccer, trajectory planning, aerodynamic forces

#### 1. 서론

임팩트(impact)는 자유 운동에서 구속된 운동으로 변이하는 동안 주위 환경과 시스템 사이 접촉지점에서의 충돌에 의해 발생한다. 인간의 동작은 주변환경과의 연속적인 임팩트로 구성되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 인간의 몸이 기구학적인 구조의 위상적인 변화를 가질 때마다 일련의 임팩트 주기 동안 나타난다. 이것은 걷기, 뛰기, 물건의 잡기나 되잡기 그리고 스포츠 동작 등에서 살펴볼 수 있다. 특히, 운동선수들은 평상시 일상생활에서 나타나는 인간 신체의 움직임에 비해 경기 도중에 더욱 큰 임팩트를 발휘하는데, 임팩트가 과도할 경우 관절에 손상을 야기시킬 수 있다.

충격량(impulse)은 임팩트의 정량적인 측정치로서 정의된다. 외부 충격량(external impulse)은 접촉지점에서 느껴지는 것이고 내부 충격량(internal impulse)은 관절에서 느껴지는 것이다. 스포츠에서 신체의 자세가 경기력의 중요한 인자가 된다는 것은 경험이 풍부한 운동선수에 의해 지적되어 왔다. 즉, 외부 충격과 내부 충격의 양은 신체의 자세에 매우 의존적인 것이다. 그림 1은 스포츠에서의 임팩트 모션을 보여주고 있다. 운동선수가 지면이나 공에 접촉하는 순간 외부충격과 내부 충격이 운동선수의 자세와 질량에 따라서 변화한다. 그림 2는 환경과 충돌하는 로봇 매니퓰레이터(manipulator)의 두 가지 형상을 보여준다. 로봇 제어 문제의 연구는 말단장치

충격을 최소화하는데 초점을 맞추어 왔다. 외관상으로 기구의 말단에서 작용하는 외부 충격을 최소화하기 위해서는 (A)의 형상이 (B)의 형상보다 나은 결과를 보인다. 그러나 내부 관절에서 느껴지는 내부 충격량에 대한 해석은 많이 진행되고 있지 않다.

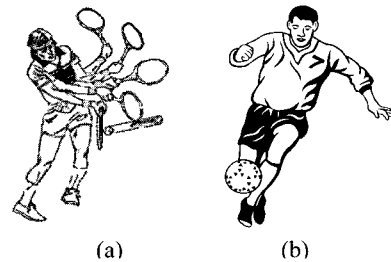


그림 1. 스포츠 동작에서의 임팩트

Fig. 1. Impact in sports action.

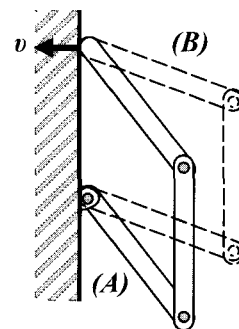


그림 2. 환경과의 충돌.

Fig. 2. Collision to environment.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 4. 6., 채택확정 : 2004. 10. 18.

최재연, 이병주, 소병록 : 한양대학교 제어계측공학과

(bluedus@ihanyang.ac.kr/bj@hanyang.ac.kr/newmal@ihanyang.ac.kr)

※ This study was supported by the Korea Health 21 R&D Project, Ministry of Health and Welfare, Republic of Korea, under Grant 02-PJ3-PG6-EV04-0003.

충격은 접촉지점에서 상호 작용하는 힘으로서 컨트롤이 어려우며, 임팩트 모델링과 컨트롤은 로보틱스 분야에서 중요한 과제로 다루어지고 있다[1,2]. 몇몇의 연구자들은 임팩트 현상을 이해하고 시뮬레이션하기 위하여 로봇 매니플레이터와 주위 환경을 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 모델링하였다[3-5]. 한편, 임팩트의 동역학은 흔히 불연속 현상으로 설명된다. 이러한 경우에 임팩트의 값을 계산하는 방법이 몇몇의 연구자들에 의해 제안되었다. 기구적인 여유를 갖는 로봇 시스템을 이용해 매니플레이터의 형상을 변화시킴으로써 원하지 않는 임팩트의 영향을 감소시킬 수 있다는 아이디어에 근거해 Walker [6] 는 직렬형태의 로봇 매니플레이터의 외부 충격 모델을 소개하였고 기구학적 여유 매니플레이터의 자가운동[self motion]을 이용함으로써 임팩트의 영향을 감소시키는 방법을 제시하였다. Liao 와 Leu [8]는 산업용 매니플레이터의 임팩트 해석을 위해서 라그랑지안 방식을 활용하여 외부 임팩트 모델을 제시하였다.

Zheng와 Hemami [11]는 뉴턴-오일러 방정식을 사용해 관절에서의 내부 충격량 모델을 유도하였으나, 이 모델에 대한 해석이 이루어지지 않았다. Wittenburg [10]는 외부와 내부 충격량의 모델링에 있어 일반적인 방법론을 제시하였으나 접근 방법이 함축적인 형태로 유도되었기 때문에 로봇 매니플레이터의 충격 모델링에 직접적으로 적용할 수 없었다. Lee 등 [12]은 직렬 체인과 폐쇄 체인 또한 하이브리드 체인을 포함한 일반적인 로봇시스템의 내부 충격량 모델을 제시하였다. 본 논문의 목적은 스포츠 행동 특히, 축구 공을 치는 동작에서 외부 충격량을 모델링하고, 충격량을 활용한 축구 공의 궤적 계획에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 간단히 외부 충격량 모델링 방법을 살피고 축구에서 공을 치는 동작에서의 외부 충격량 해석을 수행하였다[9]. 그리고 공의 원하는 궤적을 위한 공의 초기속도와 발사각으로 결정되는 공의 궤적계획 알고리즘을 소개한다. 항력과 양력 같은 공기역학적인 영향 또한 고려하였고 제안된 해석적인 방법론의 유효성을 증명하기 위해 수치적 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

**II. 외부 임팩트의 모델화**

기본적인 모델로서 축구 선수의 다리 모델을 선택하였다.

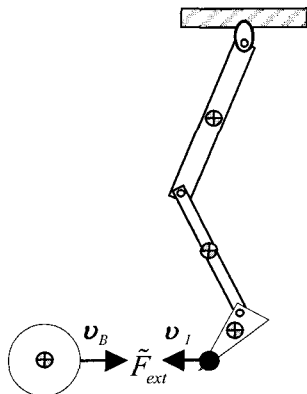


그림 3. 인간 다리의 차기 모델.  
Fig. 3. Kicking model of a human leg.

그림 3은 세 개 링크로 구성된 평면형 다리 모델을 나타낸다. 각각의 링크는 허벅지, 종아리, 발을 나타낸다.

그리고 P점은 공과 축구선수의 발사이의 임팩트 지점을 표시하고 있다.  $F_{ext}$  는 접촉지점에서의 순간적인 외부 힘을 나타낸다. 일반적으로 충돌계수  $0 < e < 1$  범위 안에서 부분적 탄성 충돌이 발생한다. 임팩트가 일어난 후 탄성계수  $e$  를 알고 있을 때 충돌하는 물체들의 상대속도는 다음의 충돌방정식에 의하여 예측된다[10].

$$(\Delta v_1 - \Delta v_2)^T n = -(1+e)(v_1 - v_2)^T n \tag{1}$$

여기서,  $n$  벡터는 접촉면에 수직인 방향으로의 단위벡터를 나타내고,  $v_1$  과  $v_2$  는 임팩트 직전의 충돌하는 물체의 절대 속도이고,  $\Delta v_1$  과  $\Delta v_2$  는 임팩트 직후의 속도 증가를 나타낸다.

Walker [6-7]은 직렬형태 시스템의 외부 임팩트 모델화 방법론을 소개하였다. 로봇 시스템이 환경과 상호 작용할 때 일반적인 로봇 시스템의 동역학 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$T = [I_{\phi\phi}^*] \ddot{\phi} + \dot{\phi}^T [P_{\phi\phi\phi}^*] \dot{\phi} - [G_{\phi}^{v_i}]^T F_{ext} \tag{2}$$

여기서  $F_{ext}$  는 접촉지점에서의 순간적인 외부 힘이고  $[G_{\phi}^{v_i}]$  는 자코비안을 나타내며 (즉, 1차 기구학적 영향 계수),  $v_i$  는 독립 관절 속도에 대한 접촉지점의 속도이다. (2)로 주어진 동역학 모델의 접촉 시간 간격으로 적분을 하면, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} T dt = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} [I_{\phi\phi}^*] \dot{\phi} dt + \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \dot{\phi}^T [P_{\phi\phi\phi}^*] \dot{\phi} dt - \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} [G_{\phi}^{v_i}]^T F_{ext} dt. \tag{3}$$

임팩트가 일어나는 모든 시간 동안 위치와 속도는 한정적이므로  $\dot{\phi}^T [P_{\phi\phi\phi}^*] \dot{\phi}$  을 포함한 적분 항과 동력 입력  $T$  을 포함하는 항은 0이 된다. 따라서 (3)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$[I_{\phi\phi}^*] (\dot{\phi}(t_0 + \Delta t) - \dot{\phi}(t_0)) = [G_{\phi}^{v_i}]^T \tilde{F}_{ext} \tag{4}$$

여기서  $\tilde{F}_{ext} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} F_{ext} dt$  는 접촉지점에서의 외부 충격량이라고 정의하고 관절 변수의 속도 증가분은 다음 식과 같다.

$$\Delta \dot{\phi} = [I_{\phi\phi}^*]^{-1} [G_{\phi}^{v_i}]^T \tilde{F}_{ext} \tag{5}$$

그리고 접촉지점에서의 속도 증가분은 다음의 기구학적인 연관관계에 의해서 구해진다.

$$\Delta v_i = [G_{\phi}^{v_i}] \Delta \dot{\phi} = [G_{\phi}^{v_i}] [I_{\phi\phi}^*]^{-1} [G_{\phi}^{v_i}]^T \tilde{F}_{ext} \tag{6}$$

$$\Delta v_B = [G_{\phi}^B] \Delta \dot{\phi} = [G_{\phi}^B] [I_{\phi\phi B}^*]^{-1} [G_{\phi}^B]^T (-\tilde{F}_{ext}) \tag{7}$$

여기서  $[G_{\phi}^B]$  과  $[I_{\phi\phi B}^*]$  은 각각 공에 대한 자코비안과 관성행렬을 나타낸다.

(6)과 (7)을 (1)에 대입하면 아래 식이 얻어진다.

$$\left\{ \left[ G_\phi^y \right] \left[ I_{\phi\phi I}^* \right]^{-1} \left[ G_\phi^y \right]^T + \left[ G_\phi^B \right] \left[ I_{\phi\phi B}^* \right]^{-1} \left[ G_\phi^B \right]^T \right\} \tilde{F}_{ext} \}^T \mathbf{n} = -(1+e)(\mathbf{v}_I - \mathbf{v}_B)^T \mathbf{n} \quad (8)$$

접촉 면에서 마찰이 없다고 가정했을 때, 충격은 항상 법선 벡터  $\mathbf{n}$  을 따라 작용한다. 따라서 외부 충격량은 다음과 같이 정의되고

$$\tilde{F}_{ext} = \tilde{F}_{ext} \mathbf{n} \quad (9)$$

(8)을 (9)의 형태로 정리하면 충격량의 크기는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{F}_{ext} = \frac{-(1+e)(\mathbf{v}_I - \mathbf{v}_B)^T \mathbf{n}}{\mathbf{n}^T \left\{ \left[ G_\phi^y \right] \left[ I_{\phi\phi I}^* \right]^{-1} \left[ G_\phi^y \right]^T + \left[ G_\phi^B \right] \left[ I_{\phi\phi B}^* \right]^{-1} \left[ G_\phi^B \right]^T \right\} \mathbf{n}} \quad (10)$$

여기서  $[I_{\phi\phi I}^*]$ 와  $[I_{\phi\phi B}^*]$ 는 각각 다리와 축구공의 관성 모멘트(또는 관성 행렬)를 나타낸다. 특히 공을 질점이라 가정했을 때 공의 관성 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$[I_{\phi\phi B}^*] = \begin{bmatrix} m_B & 0 & 0 \\ 0 & m_B & 0 \\ 0 & 0 & m_B \end{bmatrix}, \quad (11)$$

여기서  $m_B$  는 공의 질량을 나타낸다.

**III. 공기역학 모델**

축구공에 인가되는 외부 충격에 따라서 공은 초기 선형 속도와 각속도를 갖게 된다. 공을 차는 동작과 함께 발을 떠난 공은 중력과 함께 공기역학적 힘의 영향을 받게 된다.

첫째, 항력은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$F_D = C_D A \frac{\rho U_\infty^2}{2}, \quad (12)$$

이 힘은 공의 진행을 방해하는 공기의 흐름이 공에 작용하는 힘을 나타낸다. 다시 말해 항력의 방향은 공 속도의 반대 방향을 향하며, 항력에는 구의 형태에 따른 표면 항력과 압력 항력을 나타내는데, (12) 은 이 두 가지 영향을 포함한다. 식 (12)에서  $C_D$  는 항력계수,  $A$  는 공의 단면적,  $\rho$  는 표준 상태 (15°C, 1013hpa)에서의 공기 밀도 그리고  $U_\infty$  는 공기흐름의 속도를 나타낸다. 또한 비행하는 물체는 회전할 때 물체의 속도 방향에 수직방향으로 힘을 받게 된다. 이러한 현상을 “매그너스 효과”라고 한다. 이러한 효과는 공이 좌우로 휘거나 위 아래로 휘는 현상을 야기시킨다. 이러한 힘을 양력이라 부르고 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_L = C_L A \frac{\rho V^2}{2} \quad (13)$$

상수  $C_D$  와  $C_L$  는 레이놀즈 수에 근거해서 측정되고, 레이놀즈 수를 수식으로 표현하면

$$N_{Red} = \frac{\rho V D}{\mu}$$

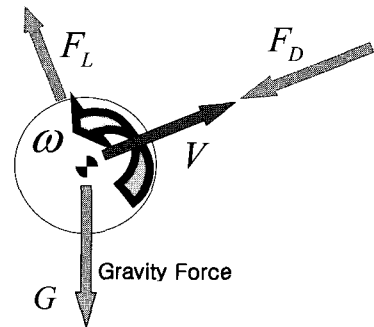


그림 4. 비행하는 공에 작용하는 공기역학적 힘. Fig. 4. Aerodynamic forces applied to a flying ball.

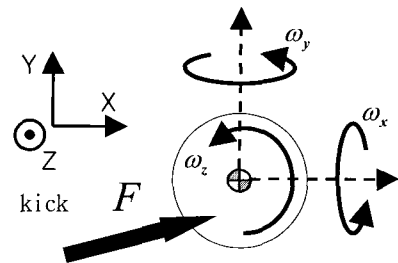


그림 5. 3자유도 회전 운동. Fig. 5. 3-DOF rotational motions.

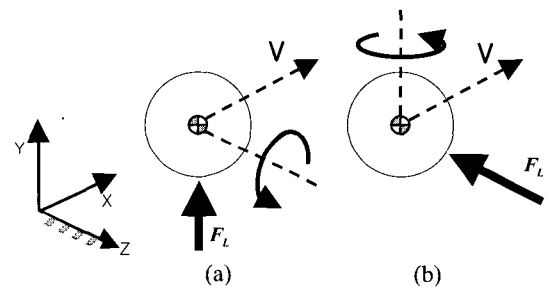


그림 6. 회전방향에 따른 양력의 방향. Fig. 6. Direction of the lift force according to the rotational direction.

여기서  $D$  는 구의 지름이고  $\mu$  는 공기의 점성계수이다. 그림 4는 선형 속도와 회전 속도를 가지고 비행하는 공의 공기역학적인 힘들을 나타낸다. 특히  $N_{Red} < 1$  의 경우에 있어서 항력을 해석적으로 구하면

$$F_D = 3\pi\mu V D, \quad (14)$$

이 경우의 항력계수는 다음과 같다.

$$C_D = \frac{24}{N_{Red}}$$

일반적으로 공이 임팩트를 받았을 때 그림 5에서 보인 바와 같이 동시에 세 가지의 회전 운동이 발생하게 된다. 이와 같은 복잡한 회전은 공의 궤적 변화를 가져온다. 양력의 방향은 공의 선형 속도와 회전 속도 두 개의 속도 방향에 대해

수직이며, 그림 6은 양력에 따른 결과를 두 가지의 예로 나타내었다.

**IV. 마찰을 고려한 외부충격 모델**

순간적인 외력이 공의 표면에 가해졌을 때 힘은 표면에서 법선과 접선 성분으로 표현된다. 공의 표면에서 마찰을 배제한다면 외부 충격의 방향은 공의 중심을 향하게 된다.

(10)은 이러한 경우를 나타내고 있다. 그러나 마찰을 고려할 때는 표면의 접선 방향을 향하는 외부 충격량이 더해지게 된다.

그림 7에서 보듯  $F_n$  과  $F_t$  는 공에 인가되는 표면의 법선과 접선 성분의 힘이다.  $F_n$  은 항상 법선 방향으로 전달되는 양이나 접선 방향을 따르는 최대 마찰력  $F_f$  은  $\mu_f F_n$  과 연관된다. 따라서  $F_t$  가  $\mu_f F_n$  의 크기를 넘어설 때는 미끄럼 현상이 일어나게 된다.

결과적으로 임팩트 기간 동안 공에 가해지는 총 외부 충격은  $\tilde{F}_n (= \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} F_n dt)$  와  $\tilde{F}_f (= \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} F_f dt)$  의 벡터 합이 된다. 여기서,  $\tilde{F}_n$  와  $\tilde{F}_f$  (혹은,  $F_n$  과  $F_f$ ) 의 방향을 검증할 필요가 있다. 우선,  $F_n$  의 방향은 공에 고정된 좌표계에 대해서 접촉 점의 위치가 주어졌을 때 계산되는  $F$  와  $F_n$  (그림 7)의 사이 각  $\alpha$  에 의해 쉽게 계산된다. 둘째로 세 개의 벡터  $F$ ,  $F_n$ ,  $F_f$  가 같은 평면상에 있으므로 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$F \cdot (F_n \times F_f) = 0, \tag{15}$$

$$F_n \cdot F_f = 0 \tag{16}$$

$F$ ,  $F_n$  과  $F_f$  의 단위 벡터들은 각각 다음과 같이 표현되며

$$F_u = [f_{ux} \quad f_{uy} \quad f_{uz}]^T,$$

$$N = [n_x \quad n_y \quad n_z]^T,$$

$$T = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T,$$

여기서  $F_u$  와  $N$  은 (15)와 (16)에 의해 구해지고  $T$  의 요소를 구해야 한다. 단위벡터의 특성에 의해

$$t_x^2 + t_y^2 + t_z^2 = 1. \tag{17}$$

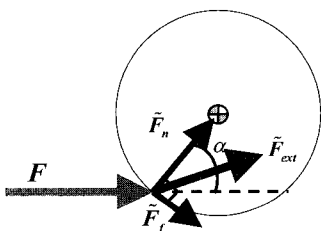


그림 7. 마찰을 고려한 외부 충격 모델.  
Fig. 7. External impulse model considering friction.

이때,  $T$  의 요소는 (15), (16)과 (17)으로부터 구할 수 있다.  $F_t$  가  $\mu_f F_n$  보다 작을 때 미끄럼은 일어나지 않는다. 따라서

$$F_f = F_t, \tag{18}$$

여기서

$$F_t = F - F_n. \tag{19}$$

반면에  $F_t$  가  $\mu_f F_n$  보다 클 때 미끄럼이 일어나게 된다. 이러한 경우 공에 전달되는 충격의 양은

$$\tilde{F}_f = |\mu_f \tilde{F}_n| T, \tag{20}$$

여기서

$$|\tilde{F}_n| = |\tilde{F}| \cos \alpha,$$

따라서 마찰로 인한 외부 충격  $\tilde{F}_f$  는 공의 중심에 대한 외부 토크를 생성시킨다. 주어지는 토크는 다음과 같고

$$\tilde{\tau} = r \times \tilde{F}_f = [I_{\omega\omega}^*] \Delta \omega_0, \tag{21}$$

이는 공에 초기 각속도  $\omega_0$  을 갖게 한다. (21) 에서  $r$  은 공의 중심에서부터 차는 지점까지의 벡터를 나타낸다.

**V. 시뮬레이션**

1. 외부 충격 해석

스포츠 선수는 운동을 하는 동안 공에 가해지는 임팩트의 양을 컨트롤해야 한다. 임팩트의 순간 공에 인가되는 외부 충격은 공의 초기 움직임을 결정짓는다. 그리고 (10)은 외부 충격량이 다리의 형상, 임팩트 순간의 속도, 그리고 다리의 동역학적 파라미터들과 연관되는 사실을 나타내고 있다. 그 예로, 공을 차는 행동에서 충격량의 특성 해석을 시도하였다. 표 1은 평면상에서 인체 다리 모델의 기구학적 동역학적 파라미터들을 나타낸다.

그림 8은 공을 차는 동작의 세 가지 자세와 함께 발의 끝 부분에는 그에 따른 외부 충격량의 크기를 보여주고 있다. (a)는 수평선에 대해 발목의 각도가 0도인 경우이고, (b)의 경우는 20도, (c)의 경우는 45도인 경우이다. 또한 지면으로부터 공에 대한 발의 입사 각은 30도이다. 그래서 외부 충격의 방향이 공의 중심을 향하고 있다면 외부 충격의 방향은 입사 각의 방향과 동일하다. 시뮬레이션 결과에 따라 지면에 대해 발목의 각도가 커질수록 외부 충격의 양은 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 지면에 평행한 발목의 형태가 공에 큰 외부 충격량을 전달함을 알 수 있다. 발의 속도가 1[m/s]로 주어졌을 때 세 경우의 외부 충격을 표 2에 열거하였다.

2. 축구공의 궤적 시뮬레이션

뉴턴-오일러 방정식에 근거하여 공의 동역학을 표현하면

$$F = m_b a_b = F_D + F_L + m_b g, \tag{22}$$

$$\tau = [{}^c I]{}^c \dot{\omega} + {}^c \omega \times [{}^c I]{}^c \omega, \tag{23}$$

표 1. 인간 모델의 크기와 관성.

Table 1. The size and inertia of the human model.

	Length(m)	Mass(kg)	Inertia(kg · m <sup>2</sup> )
Thigh	0.371	7	0.08
Shank	0.443	3	0.049
Foot	0.145	1	0.0018

표 2. 외부 충격량.

Table 2. External impulse.

	case (a)	case (b)	Case (c)
X (N·s)	1.346	0.817	0.559
Y (N·s)	0.777	0.472	0.323
Total (N·s)	1.554	0.944	0.646

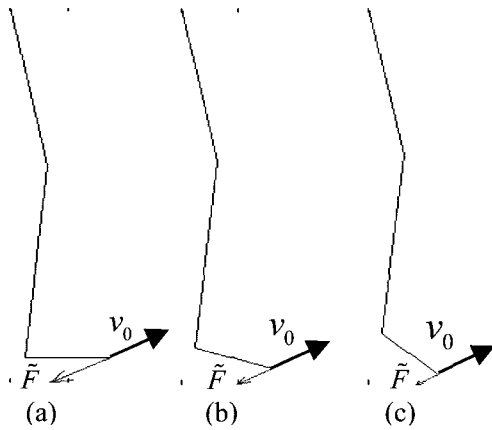


그림 8. 차는 동작의 외부 충격량.

Fig. 8. External impulse of kicking motion.

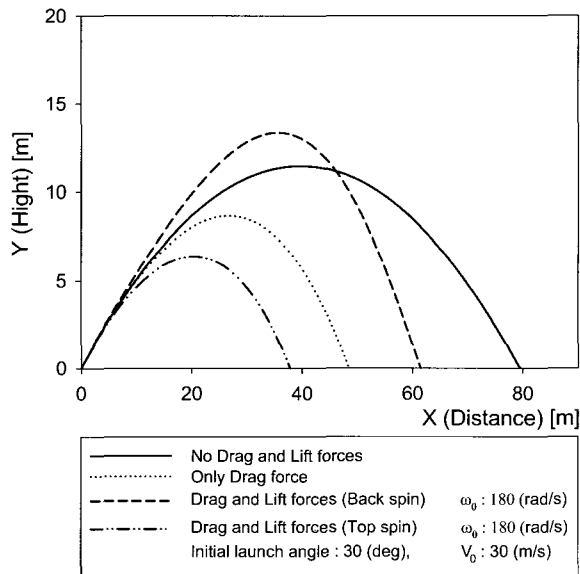


그림 9. 비행하는 공의 평면 궤적.

Fig. 9. Planar trajectory of a flying ball.

여기서 ‘ $\omega$ ’는 공 좌표계를 기준으로 한 각속도 벡터이다. 공을 속이 빈 구의 외형으로 가정하면 공 좌표계를 기준으로 한 축구공의 관성텐서 [ $I$ ]는 다음과 같이 표현된다.

$$[I] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}m_b r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}m_b r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}m_b r^2 \end{bmatrix}$$

여기서  $r$ 은 공의 반지름을 나타낸다. 만약 공을 질점으로 모델링하면 항력과 양력의 영향을 받지 않는다. 따라서  $F_b$ 와  $F_l$ 은 0이 된다. 그러나 공을 강체로 모델링하면  $F_b$ 와  $F_l$ 은 운동하는 동안 연속적으로 변화하게 될 것이다. 전역 좌표계에 대한 축구공의 위치와 회전은 뉴턴-오일러 방정식의 수치적인 적분으로 구해진다. 움직이는 동안 항력과 양력 계수는 연속적으로 갱신되어야 한다. 임팩트가 일어난 후 축구공은 비행이나 구르기 시작한다. 공기역학적인 힘과 중력은 공 궤적에 영향을 주며 공에 주어지는 임팩트의 위치에 따라서 공의 초기속도 특성이 결정된다. 여기서, 축구공의 표면에 대한 마찰계수는 0.4로 가정하였다.

그림 9는 2차원 공간에서 공의 네 가지 궤적을 나타내고 있다. 그림에서 보듯 항력은 공의 움직임을 방해하므로 항력이 존재하지 않을 때보다 좀더 짧은 거리를 비행하게 된다. 또한 임팩트로 인해 공에 정회전이나 역회전이 생성될 때 공은 양력에 의한 영향을 받게 된다. 역회전은 가장 큰 값의 높이를 산출하는 반면, 정회전은 가장 낮은 값의 높이를 야기시키고 실질적으로도 짧은 도달 거리를 갖게 된다. 이러한 결과는 실제 축구공의 궤적과 부합된다.

그림 10은 역회전의 경우에 세 가지 다른 위치에 임팩트를 가했을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 이때, 세 경우 발에서 같은 속도와 같은 형상을 갖는다고 가정한다. 세 번째 경우 가장 큰 역회전을 갖고 가장 높고 멀리 비행하게 된다. 그림 10(c)의 표는 임팩트가 일어난 후 선형 동작과 회전 동작에 대한 내용을 보여주고 있다.

일반적인 3차원의 경우, 공은 세 개의 회전 동작을 갖는다. 그림 11은 세 가지 다른 위치에서 공에 임팩트를 가했을 때 축구공의 궤적을 보여주고 있다. 그림 11의 가운데 궤적은 공의 중심 아래 부분에 임팩트를 가했을 때 생성된다. 공은 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 A축에 대해서 역회전과 함께 전방으로의 선형 속도를 갖고 공의 궤적은 2차원이 된다. 그림 11의 왼쪽 궤적은 공의 오른쪽 아랫부분에 임팩트를 주었을 경우에 해당한다. 공은 그림 12(b)에서 보는 바와 같이 B축에 대해서 역회전과 함께 전방으로의 선형 속도를 갖고 공의 궤적은 왼쪽으로 휘게 된다. 마지막으로 오른쪽의 휘어지는 궤적은 그림 12(c)와 같이 주어진 초기 각속도에 의해 생성된다. 그리고 시뮬레이션 데이터와 가정은 표3에 주어진 바와 같다.

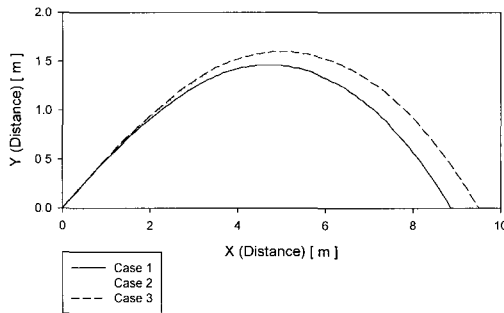
3. 축구공의 모의 궤적계획

축구에서 무엇보다 먼저 기본적인 기술은 축구공을 원하

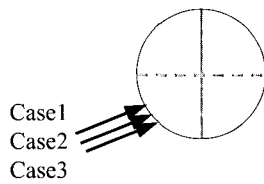
표 3. 시뮬레이션 자료.

Table 3. Simulation data.

External disturbance wind	None
Air density	1.220 [ Kg / m <sup>3</sup> ]
Radius of ball	0.1 [ m ]
Mass of ball	0.45 [ Kg ]
Coefficient of Viscosity	1.8E-5
Gravity acceleration	9.81 [ m / s <sup>2</sup> ]
Foot velocity	1.2 [ m / s ]



(a)



(b)

	Linear velocity	Angular velocity	launch angle(deg)	Foot vel[m/s]
Case 1	12.82	37.9	28.62	1.2
Case 2	12.81	54.2	28.67	1.2
Case 3	12.8	69.8	28.7	1.2

(c)

그림 10. 다른 임팩트 위치에 따른 궤적.

Fig. 10. Trajectory for different impact position.

는 시간에 다른 선수의 지점에 전달하는 기술일 것이다.

이것은 중력조건에서의 간단한 질점 운동으로부터 쉽게 이해할 수 있다. 질점이 그림 13에서 보듯이 초기속도  $v_0$  로 발사되었을 때 임의의 시간에서 도달거리  $x$ 와 높이  $y$ 는 아래 식과 같이 표현된다.

$$X = (v_0 \cos \theta)t, \tag{24}$$

$$Y = (v_0 \sin \theta)t - \frac{1}{2}gt^2, \tag{25}$$

그리고 (24)을 다시 쓰면 다음과 같고

$$X/t = v_0 \cos \theta$$

위 식을 살펴보면 도달거리  $x$ 와 도달 시간  $t$ 는 공의 초기

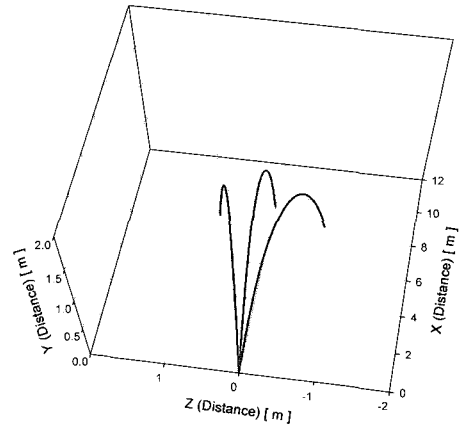


그림 11. 비행하는 공의 3차원 궤적.

Fig. 11. Three-dimension trajectory of a flying ball.

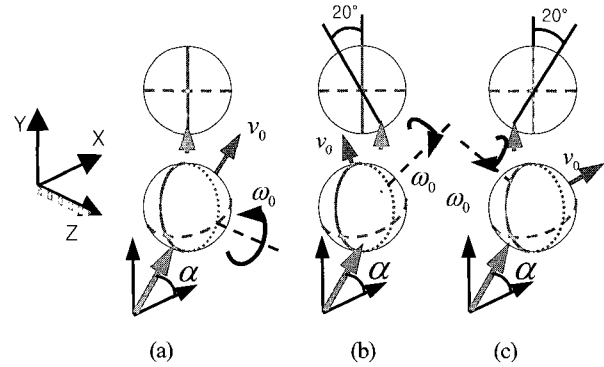


그림 12. 축구공의 초기속도 프로파일(후면과 측면).

Fig. 12. Initial velocity profiles of the soccer ball(back and side view).

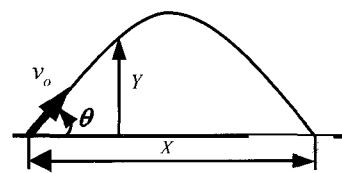


그림 13. 중력장에서 질점의 궤적.

Fig. 13. Trajectory of a particle under the gravity field.

속도와 발사각의 함수임을 알 수 있다.

그러나 공기역학적 힘들로 인해 뉴턴-오일러 방정식은 매우 비선형이 되어 실제 축구공의 궤적은 질점의 경우와 같이 폐 형식의 해를 갖지 못한다. 그러므로 축구공의 궤적계획은 어떤 종류의 알고리즘에 기초를 두어야 한다. 여기서, 하나의 간단한 오프라인 훈련 알고리즘을 설명하기로 한다. 축구공의 도달시간( $t$ )과 도달거리( $x$ )를 제어하기 위하여 그림 14에서와 같이 간단한 제어 알고리즘을 적용하였다.

오프라인 제어 알고리즘은 주어진 축구공의 궤적을 만족하기 위한 제어 알고리즘이 컨트롤러에 내장되었다. 그림 15는 제어를 위한 순서도를 보여주고 있다. 이 알고리즘은 모델 기반이고 간단한 지능 알고리즘과 유사하며 이는 목표

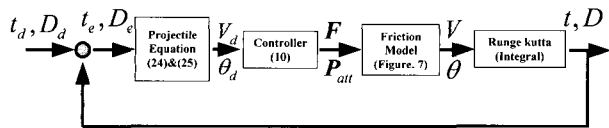


그림 14. 공의 도달 시간과 도달 거리 컨트롤을 위한 블록도.  
Fig. 14. Block diagram for controlling the arrival time and arrival distance of a ball.

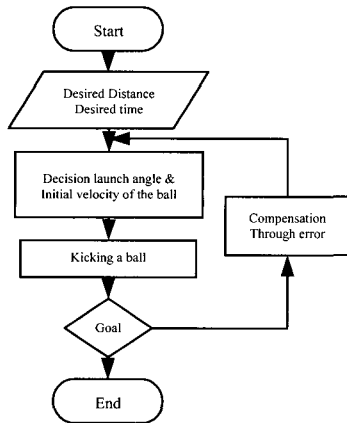
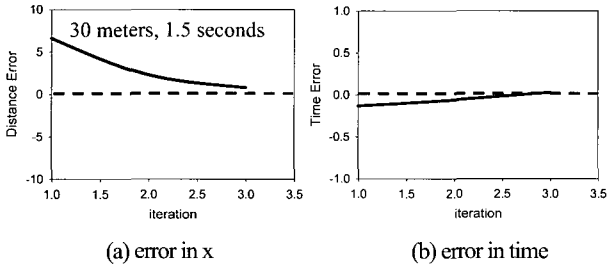
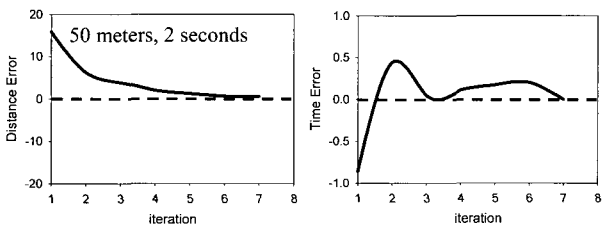


그림 15. 원하는 거리와 도달 시간을 구하기 위한 순서도.  
Fig. 15. Flowchart to obtain the desired distance and arrival time.



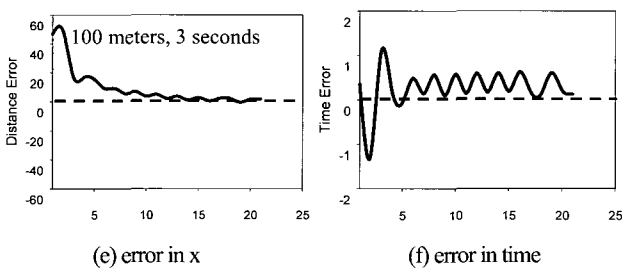
(a) error in x

(b) error in time



(c) error in x

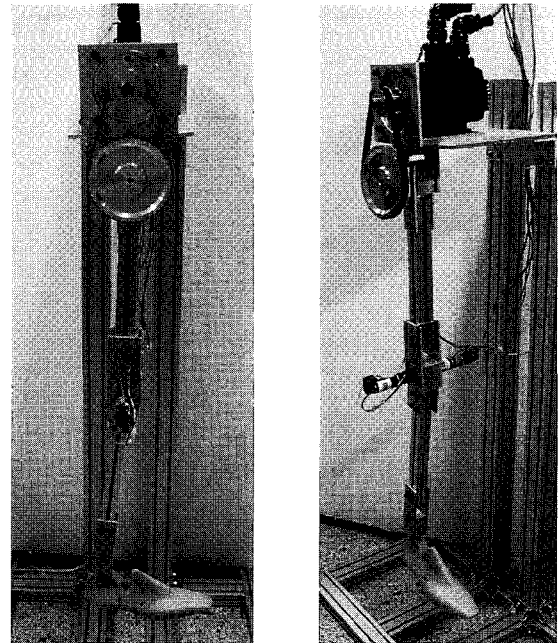
(d) error in time



(e) error in x

(f) error in time

그림 16. 축구공의 궤적 계획.  
Fig. 16. Trajectory planning of the soccer ball.



(a) Side view

(b) Isometric view

그림 17. 축구공을 차기 위한 실험 기구.  
Fig. 17. Experimental setup for kicking a soccer ball.

표 4. 다른 임팩트 각에 대한 실험 결과.

Table 4. Experimental result for different impact angles.

Impact point of ball $\theta$ [deg]	Foot velocity [m/s]	Distance [m]	
		Experiment	Simulation
30	2.2	3.9	3.75
40	2.2	6.5	6.86
50	2.2	7.5	8

표 5. 다른 임팩트 속도에 대한 실험 결과.

Table 5. Experimental result for different impact velocities.

Attack angle [deg]	Impact point of ball $\theta$ [deg]	Foot velocity [m/s]	Distance [m]	
			Experiment	Simulation
20	50	2.2	7.5	8
20	50	2.0	6.3	6.75
20	50	1.8	5.3	5.53

표 6. 기구학적, 동역학적 파라미터들.

Table 6. Kinematic, dynamic parameters.

	Thigh	Shank	Foot
Link length (m)	0.4	0.396	0.22
Weight (kg)	1.712	1.074	0.57
Inertia (kg·m <sup>2</sup> )	0.02305	0.01413	0.00055
Mass center (m)	0.2	0.198	0.073

치와 매 시간 단계에서의 값 사이의 오차를 최소화하기 위한 외부 임팩트와 차는 위치를 갱신한다. 축구공의 궤적은 피드백 제어가 가능한 것이 아니므로, 주어진 컨트롤러는 실시간으로 축구공의 궤적을 제어하는 개념이 아니라 오프라인 제어의 개념을 나타낸다. 따라서 목표로 삼는 도달시간과 도달 거리를 충족시키기 위한 공의 초기속도 및 각도를 얻는 것이 최종 결과로 나타날 것이다. 시뮬레이션에서 (24)과 (25)에서 주어진 질점 운동의 폐 형식 해는 명목치(nominal value)로 사용한다. 단순화를 위해 회전이 없는 선형동작만으로 가정하였고 도달 거리와 도달 시간에 학습 계획을 적용한다. 시뮬레이션 데이터는 그림 9에서와 동일한 값을 사용한다.

서로 다른 세 가지 경우의 원하는  $x$ 와  $t$ 에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 첫째로 그림 16(a)와 (b)는 30미터와 1.5초를 목표로 하였을 때 각각 거리와 시간에 대한 오차를 나타내었고, 그림 16(c)와 (d)는 50미터와 2초를 목표로 하였을 경우, 그림 16(e)와 (f)는 100미터와 3초를 목표로 하였을 경우에 대해 나타내었다. 전반적으로 명목 치와 실제 값 사이의 각각의 오차는 목적인 제어 알고리즘을 적용함으로써 감소하는 것을 보여준다. 또한 목표로 하는 거리와 시간의 값이 커질수록 알고리즘의 반복하는 횟수가 증가함을 볼 수 있다.

#### 4. 실험 결과

그림 17은 차는 실험을 위한 실험 기구를 보여주고 있다. 각각 골반 관절에는 AC모터를 사용하였고 무릎 관절에는 DC모터를 사용하였다. 일반적으로 차는 동작은 모터의 큰 토크를 필요로 하므로 큰 토크 용량과 높은 과워를 갖는 모터를 사용하였다. 표6에 실험기구의 기구학적 동역학적 파라미터들을 나타내었다. 표4에는 서로 다른 세 위치에서 가한 임팩트에 대한 결과를 나타내었다. 세 경우 모두 임팩트의 순간 같은 발의 속도와 형상을 갖는다. 다리 로봇이 50도 위치를 찾을 때 축구공은 가장 멀고 높이 비행한다. 두 번째 실험은 같은 임팩트 각을 가지나 다른 임팩트 속도에 대해서 수행하였다. 표8과 표5는 실험과 시뮬레이션 간의 오차가 10%이내 임을 보여주고 있다.

실험과 시뮬레이션의 불일치는 축구공의 편향과 임팩트 순간에 에너지 소비의 부정확한 모델과 공기역학적 영향의 부정확한 모델화에 기인한다. 그러나 축구공 궤적의 추정에서 오차 비는 만족스러운 결과를 보인다. 좀더 강력한 모터를 장착한다면 좀더 긴 거리에 대한 실험을 수행할 수 있으리라 기대한다.

## VI. 결론

현재, 세계적으로 많은 인간형 로봇에 대한 연구가 진행되고 있다. 이로 인해 휴머노이드의 개념이 대중화되면서 휴머노이드의 효율적인 응용이 필요하다. 이러한 잠재적인 응용 분야의 일환으로서 로봇 스포츠를 들 수 있다. 그러나 현재의 설계 및 제어 기술은 다양한 스포츠 행동에서 임팩트를 컨트롤할 수 있는 수준과는 동떨어져 있다. 본 논문에서는 공의 도달 시간과 도달 거리를 고려하여 차는 동작에서의 충격량 모델과 축구공의 궤적 계획을 다루고 있다. 비록 본 작업의 다리 모델이 2차원의 평면형이지만 축구공의 모의 실험된 궤적과 실험 결과는 사람의 경험에 비추어볼 때 만족할

만한 결과를 보여주고 있음을 살펴 볼 수 있다.

차후 작업으로는 좀더 일반적인 축구공의 궤적 계획을 위해 좀더 개선된 신체 모델을 적용하는 부분이 있을 것이다. 그리고 공의 원거리 궤적을 얻기 위한 상당히 강력한 실험 기구를 개발되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] R. M. Brach, "Classical planar impact theory and the tip impact of a slender rod", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 21-33, 1993.
- [2] G. Ferretti, G. Magnani, and A. Zavala Rio, "Impact modeling and control for industrial manipulators", *IEEE Control System Magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 65-71, 1998.
- [3] J. K. Mills and C. V. Nguyen, "Robotic manipulator collisions: modeling and simulation", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 114, no. 4, pp. 650-659, 1992.
- [4] A. S. Yigit, "The effect of flexibility on the impact response of a two-link rigid-flexible manipulator", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 177, no. 3, pp. 349-361, 1994.
- [5] K. Youcef-Toumi and D.A. Gutz, "Impact and force control", *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 410-416, 1989.
- [6] I. D. Walker, "The use of kinematic redundancy in reducing impact and contact effects in manipulation", *Proceeding of 1990 IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 434-439, 1990.
- [7] I. D. Walker, "Impact configurations and measures for kinematically redundant and multiple armed robot systems", *IEEE Trans. on Robotics Automation*, vol.12, no.5, pp. 670-683, 1994.
- [8] H. T. Liao and M. C. Leu, "Analysis of impact in robotic peg-in-hole assembly", *Robotica*, vol. 16, no. 3, pp. 347-356, 1998.
- [9] Y. Nakamura and M. Ghodoussi, "Dynamic computation of closed-link robot mechanisms with non-redundant and redundant actuators", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 294-302, 1989.
- [10] J. Wittenburg, *Dynamics of systems of rigid bodies*, Stuttgart, B. G. Teubner, 1977.
- [11] Y. F. Zheng and H. Henami, "Mathematical modeling of a robot collision with its environment", *Journal of Robotic Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 289-307, 1985.
- [12] S. H. Lee, B. J. Yi, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, "Modeling and analysis of internal impact for general classes of robotic mechanism", *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Systems*, pp. 1955-1962, 2000.
- [13] R. A. Freeman and D. Tesar, "Dynamic modeling of serial and parallel mechanisms/robotic systems, part I-methodology, part II-applications", *Proceedings on 20th ASME Biennial Mechanisms Conference, Trends and Development in Mechanisms, Machines, and Robotics*, Orlando, FL, DE-vol. 15-3, pp. 7-27, 1988.
- [14] B. J. Son, J. S. Maeng and S. H. Lee, *Fluid dynamics*, Seoul, Hee Jung Dang, 1992.
- [15] B. R. So, B.-J. Yi and W. K. Kim, "Impulse analysis its applications to dynamic environment", *ASME Biennial Mechanism*, Montreal, Canada, 2002.
- [16] A. Ming, T. Teshima, T. Takayama, and M. Kajitani, "Control of a new golf swing robot with considering hitting a ball", *Systems*,



*Man, and Cybernetics, 2001 IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 365-370, 2001.

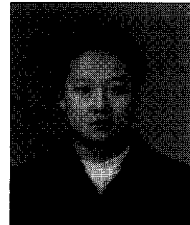
[17] 이지홍, "속도 제한에 의한 충격량 도형에 관한 연구", 제

어자동화시스템 공학회 논문집 제 5권 제 8호 pp. 955-960, 1999.



#### 최재연

1976년 11월 25일생. 2001년 한양대학교 제어계측공학과 졸업, 동대학원 석사(2003), 동 대학원 박사과정. 관심분야는 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, Humanoid system modeling and analysis.



#### 소병록

1974년 10월 11일생. 1997년 한양대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동대학원(공학 석사). 2000년~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 Humanoid, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, Impact control.



#### 이병주

1960년 6월 7일생. 1984년 한양대학교 기계공학과 졸업, 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1986). 동대학원 박사(1991년). 1992년~1995년 한국 기술교육대학교 제어공학과 조교수. 1995년~현재 한양대학교 제어계측공학과 교수. 관

심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and controls, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.