



한국운동역학회지, 2005, 제15권 1호, pp. 45-61
Korean Journal of Sport Biomechanics
2005, Vol. 15, No. 1, pp. 45-61

인간의 자세조절 메커니즘에 대한 연구

이동우*(광주교육대학교)

ABSTRACT

A Review on the Mechanism of Human Postural Control

Lee, Dong-Woo*(Gwangju National University of Education)

D. W. LEE, A Review on the mechanism of human postural control. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 15, No. 1, pp. 45-61, 2005. Stance is defined as any state in which the total mass of the body is supported by the feet. In order to maintain stance, the sum of gravito-inertial forces acting on the body must be registered by equal and opposite forces at the region of contact between the organism and the support surface. Balance is controlled by applying forces to the surface of support so as to maintain the body's center of mass vertically above the feet. For a multi-segment organism, there can be a variety of ways in which balance can be controlled, since movements of different body segments can have similar effects on the control of balance. In general, the organism tends to have a body configuration that is aligned with gravito-inertial force when there are no external forces acting on it. If any segments of the body are not aligned with gravito-inertial force vector, a torque on that segment would tend to move the body's center of mass.

The maintenance of postural stability is accomplished in humans by a complex neural control system. This requires organizing, integrating, and acting upon visual, vestibular, and somatosensory

이 연구는 2003년 광주교육대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

* dongw921@gnue.ac.kr

input, providing orientation information to the postural control system. The information necessary to control and coordinate movement is provided by the visual sense of eye position with respect to the surrounding surface layout, the vestibular sense of head orientation in the gravito-inertial space, and the somatic sense of body segment position relative to one another and to the support surface.

In this study, perception and action capability was examined from various points of view. The underlying assumption of the study was that the change of postural configuration could be effected by organism, environment and task goal.

KEYWORDS: POSTURE, BODY CONFIGURATION, CONSTRAINTS, STRETEGY

I. 서 론

직립자세는 인간에게 있어서 가장 기본적인 활동이라 할 수 있다. 다윈이 언급했듯이 직립자세는 인간에게 손을 자유롭게 사용할 수 있도록 했을 뿐만 아니라 인류문명 발달에 크게 공헌하였다. 물론 직립자세가 가져다주는 문제점도 없지 않지만 아직까지도 인간의 기본행동인 자세조절에 관한 기전에 대한 지식이 충분치 못할 뿐만 아니라 어떤 경우에는 잘못 인식되는 있는 경향이 있다. 그 이유에는 여러가지 원인이 있을 수 있는데 대표적인 것이 인간의 자세가 모든 신전반사의 집합이라는 전통적인 학자들의 주장과 현재의 행동 과학자들이 주장하는 자세조절과 수의적인 동작과의 차별화 그리고 자세조절이 신전반사의 중요한 예가 된다는 사실이다(김선진·한동욱, 2002).

직립자세는 몸전체의 질량이 발에 의하여 지지되는 상태이다. 이러한 자세를 유지하기 위해서는 신체에 작용하는 중력과 관성력의 총화(sum of gravito-inertial forces)와 같은 크기이며 방향이 반대인 힘이 인간과 지지면이 접촉하고 있는 부분에 작용해야 한다(Riccio & Stoffregen, 1988). 균형된 자세를 취하기 위해서는 신체의 무게중심을 발바닥안에 위치시키도록 지면에 힘을 가해야 한다. 인간의 신체는 수많은 분절로 구성되어 있기 때문에 몸의 균형을 유지하는데 여러 가지 방법이 이용될 수 있다. 일반적으로 외력이 작용하지 않는 경우, 신체분절을 중력선에서 벗어나지 않도록 해야 한다. 만약 신체의 어느 분절이라도 중심선에서 벗어나게 되면 토크가 발생하게 되며, 이것은 신체 중심선을 변경시키기 때문이다.

안정된 자세는 복잡한 운동기능 수행에 필수적인 것이며 인간에게 있어서는 복잡한 신경계의 작용이 수반된다(Barin, 1989; Horak & Nashner, 1986). 따라서, 시각, 전정기관, 체감각기관 등과 같은 자세 조절과 관련된 정보들을 통합하여 조직화하는 과정이 필수적으로 요구된다. 다시 말해서 자세 조절을 하거나 협응된 동작을 실시하는 데에는 환경에 관련된 정보를 받아들이는 시각, 머리의 위치

를 감지하는 전정기관, 신체분절의 상대적인 위치나 환경에 대한 위치를 인지하는 체감각기관 등의 기능이 필요하다는 것이다(Owen & Lee, 1986; Stoffregen & Riccio, 1988).

인체는 강체로 된 분절들이 관절에 의하여 고리처럼 연결된 형태를 취하고 있다. 따라서 신체의 어느 한 분절에 작용한 근력이나 외력은 관성 짝힘(inertial coupling forces)를 통해 다른 분절에 영향을 미치게 된다(Barin, 1989; Kugler & Turvey, 1987). 정상 직립 자세에서 신체 분절은 발목관절 위에 무게중심선이 위치하는 똑바른 자세를 보여준다. 그 결과, 중력으로 인한 토크가 크게 필요하지 않는 상태를 유지하게 되며 이러한 상태를 자세조절 시스템이 중력에 대하여 평형(equilibrium) 상태에 있다고 말한다(Nashner & McCollum, 1985; Riccio & Stoffregen, 1988). 만약 외력이 작용하지 않는다면 인간에 의한 보상행동(compensatory movement)이 일어나지 않지만 신체의 한 분절의 위치가 무게중심선에서 멀어지게 되면 이를 보상하기 위한 에너지가 필요하게 된다.

다분절로 이루어진 인간의 자세조절 시스템은 다양한 형태의 협응 형태를 나타낸다. 왜냐하면 어느 한 분절의 움직임이 다른 분절에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 똑같은 자세를 취하는 경우에도 서로 다른 신체 분절의 움직임이 있을 수 있기 때문이다. 앞에서도 언급했듯이 인간의 자세조절은 유기체, 환경, 과제 등의 특성이 변함에 따라 상이한 반응을 보여준다. 최적의 자세 형태는 이들 세 가지 요인의 상호작용의 결과 나타난다(Horak & Nashner, 1986).

복플렉스 시스템인 인간의 자세조절은 신체분절에 대한 상대적인 위치를 유지하는 것뿐만 아니라 주어진 과제를 수행하기 위하여 미세한 조절반응을 필요로 하기도 한다. 본 연구에서는 인간의 자세조절과 관련된 여러 가지 요인들에 대하여 체계적이고 세밀하게 고찰하는데 주안점을 두고자 하였다.

II. 정위 공간과 감각 정보

1. 정위 공간

정위 공간(configuration space)이란 절대 좌표계 내에서 나타낼 수 있는 유기체의 외형적 공간을 말한다(Nashner & McCollum, 1985). 이 공간은 즉관절과 고관절이 직교하는 좌표계의 형태로써 유기체 분절의 위치를 효과적으로 나타내는데 매우 좋다<그림 1>. 이 그림은 자세 조절을 위하여 즉관절과 고관절이 어떻게 변화할 수 있는가를 잘 설명해줄 수 있다. 신체가 중력에 대하여 똑바로 서 있을 때, 몸 전체 또는 신체 분절이 외력에 대하여 균형을 유지하고 있으며 신체에 작용하는 토크(torque)도 최소가 된다. 지지면이 편평하다면 이러한 상황에서 직립자세는 정위공간의 원점에 위치한다.

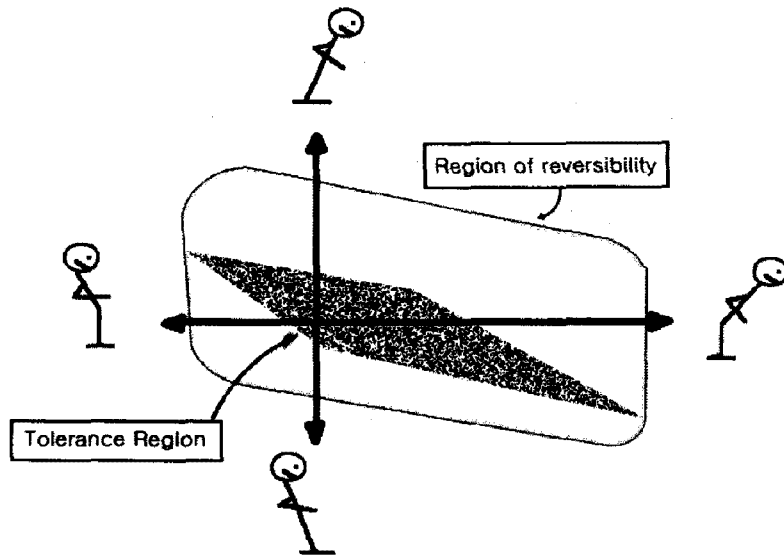


그림 1. 정위공간(adapted from Nashner & McCollum, 1985)

신체의 다른 부분을 움직이지 않고 자세 조절을 할 수 있는 조그만 범위가 있는데 이를 허용 영역(tolerance region)이라고 한다(정위공간에서 회색부분에 해당됨). 정위공간에서 고관절-족관절 평면의 원점을 어트랙터(attractor)라고 한다(Abraham & Shaw, 1984). 어트랙터는 항상 원점에 위치하는 것이 아니다. 유기체가 직립이 아닌 자세로 과제를 수행하는 경우에는 고관절-족관절 평면의 다른 영역이 어트랙터가 된다. 외력이나 외부로부터의 자극에 의한 영향으로도 어트랙터의 위치는 변할 수 있다. 외력의 영향이 매우 큰 경우에는 목표 달성을 위하여 적절한 자세를 유지하지 못하는 경우도 있다.

Nashner & McCollum(1985)는 족관절, 슬관절, 고관절로 구성된 추상적인 3차원 정위공간을 개발하였다(그림 2). 세 가지 관절의 조합을 통하여 형태는 다르지만 역학적으로는 목표 달성에 똑같은 영향을 미치는 자세가 여러 가지가 있다. 즉, 족관절의 각도는 변화시키지 않으면서 고관절 슬관절의 협응을 통하여 주어진 목표 달성을 위한 자세를 취하는 것이 가능하다는 것이다.

3차원 공간좌표계에서 수평면은 슬관절이 고정된 상태에서의 움직임을 나타낸다. 이 평면은 고관절 축을 따라 약간 휘어져 있는데 그 이유는 고관절을 중심으로 허리를 움직이게 되면 족관절의 수직축에 대하여 무게 중심의 거리가 다소 감소시키기 때문이다. 수직축은 몸을 굽히는 상태를 나타내는 것으로 족관절에 대한 무게 중심의 수직 거리가 점점 감소하는 자세를 나타낸다.

비직립 균형 자세(non-erect balanced position)의 궤적은 3번째 축이 되는데 이러한 자세는 신체의 무게 중심이 지지면의 기하학적 중심 위에 위치한다. 이 평면은 수직축과 원점을 지나며 슬관절이 전혀 굽혀지지 않은 상태에서의 자세 조절이 행해진다. 비직립 균형을 벗어나게 되면 중력의 영향으로 신체가 안정된 자세로부터 벗어나게 된다.

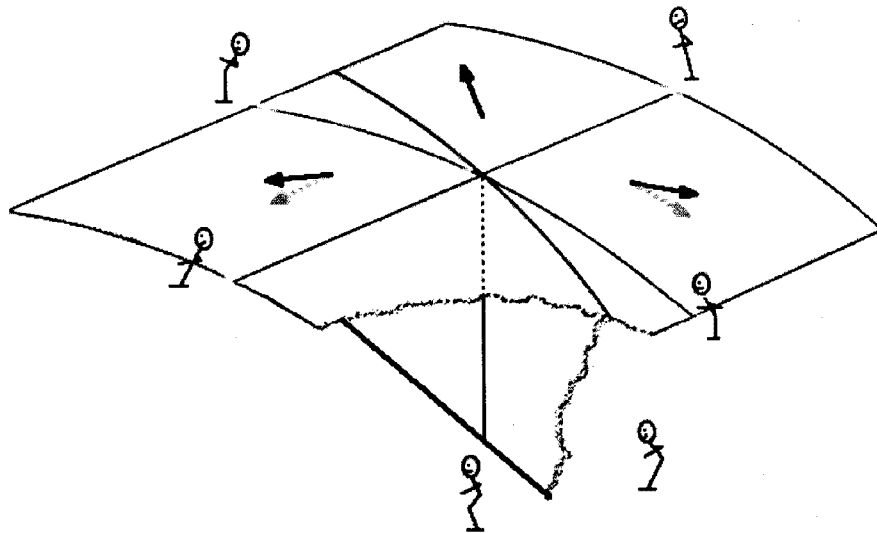


그림 2. 3차원 신체 정위공간(adapted from 'Nashner & McCollum, 1985)

균형 잡힌 자세를 유지하는데 필요한 감각기관의 역할과 근수축 작용에 대한 개념적 모델이 Nashner & McCollum(1985)에 의한 개발되었다. 그들은 직립자세를 각 신체분절이 연결된 전도된 복합 진자(inverted compound pendulum)로 보고 자세 반응에 대한 근수축 기전을 설명하려고 하였다. 그들은 자세 조절에 전신의 근육이 동원되기는 하지만 비복근(gastrocnemius), 전경골근(tibialis anterior), 햄스트링근(hamstring), 대퇴사두근(quadriceps), 척수배근(paraspinals) 복근(abdominals) 등 10여개의 근육이 주도적인 역할을 한다고 하였다. 이러한 근육들의 협응된 활동을 근 시너지(muscle synergy)라 한다.

2. 자세 조절과 관련된 정보

신체 위치와 관련된 정보는 이석(otolith), 세반고리관(semicircular canals), 근방추(muscle spindles), 골지건(golgi tendon), 관절수용기(joint receptors), 피부수용기(cutaneous receptors), 눈(eye) 등 여러 가지 감각 기관을 통해서 획득된다. 어떤 과제를 수행할 때 신체 움직임에 대한 정보는 하나의 감각 정보에 의해 얻어지는 것이 아니라 동원된 신체 분절에 있는 모든 감각 기관으로부터 전달해진다. 각각의 감각 기관은 서로 다른 준거에 따른 정보를 중추신경계에 전달해주므로 이를 통합적으로 재구성해야 적절한 반응을 할 수 있어진다. 많은 연구 결과 신체의 움직임을 조절하는데 필요한 정보들 중 지표면에 대한 정보는 시각을 통해서, 중력에 대한 머리의 위치에 대한 정보는 전정기관을 통해서, 신체 각 분절의 상대적 위치는 체감각 기관을 통해서 획득된다고 밝혀졌다(Nashner & McCollum, 1985; Riccio & Stoffregen, 1988; Shumway-Cook & Wollacot, 1985). 다양한 환경의 변화 속에서 신체 균형을 유지하고 자세를 조절하기 위해서는 환경과 중력에 대한 신체의

위치와 움직임에 대한 정보 간에 통합 작용이 이루어져야 한다.

체감각 정보 체감각계는 근방추, 골지건, 관절 수용기, 피부 수용기로 구성된다. 근방추는 근육 길이의 변화를 감지하고, 골지건은 근육의 수축과 신전에 의한 장력의 변화에 민감하게 반응한다. 또한, 관절 수용기를 구성하고 있는 루피니 종말, 파치니 소체, 자율신경 종말 등은 움직임에 필요한 역학적 정보를 제공한다. 피부 수용기는 전적으로 외부 환경으로부터의 정보를 감지하며 감각 정보의 유형에 따라 역할수용기, 열수용기, 통각수용기로 구별된다. 피부 수용기의 정보는 일반적으로 중추신경계 전반에 걸쳐 처리되는데, 특히 중추신경계의 하위 수준에서는 반사운동에 관여하기도 한다. 예를 들면, 발바닥에 약하고 범위가 넓은 자극을 주게 되면 다리를 펴는데 이러한 반사운동을 착지반사(placing reflex)라고 한다. 이와 달리 발바닥에 날카롭고 집중적인 자극을 주게 되면 다리를 굽히는데 이러한 반사운동을 철회반사(withdrawal reflex)라고 한다. 이러한 움직임은 운동 상해 예방과 밀접한 관련이 있다(김선진·박승하, 2001).

자세 조절 능력은 근골격계의 기능과 밀접한 관련이 있다. 특히 관절의 가동 범위, 척추의 유연성, 근육의 특성, 연결된 신체 분절 간의 역학적 관계 등이 중요한 역할을 한다. 신체는 많은 근육과 뼈로 이루어져 있기 때문에 환경과 과제의 변화에 따라 기능적인 근육 집단, 즉 조직화된 협응 형태로 자세를 조절한다. 많은 근육이 시·공간상에서 적절한 근수축을 함으로써 자세를 유지할 수 있는 것이다. 이를 바탕으로 일상생활에서의 다양한 과제 수행과 고도로 발달된 스포츠 수행을 할 수 있는 것이다. 자세 조절을 위한 근육의 기능적인 단위로서 협응 구조는 신경 작용에 있어서도 이점을 제공한다. 즉 기능적인 협응 형태는 신경계가 움직임을 만들어 내는 데 필요한 많은 구심성 신호를 감소시킬 수 있게 하며, 운동제어에 있어 나타나는 많은 원심성 활동을 감소시킬 수 있게 한다(김선진·한동욱, 2002). 특히 자세 조절은 이러한 복잡한 신경 체계의 기능적인 역할로 인하여 일정한 운동 협응의 형태를 나타낸다. 또한 모든 자세 조절과 운동수행은 신체에서 발생하는 환경적 단서와 내적 정보의 습득을 필요로 한다. 정보의 습득은 상위의 뇌 수준에 의하여 생성된 조직화된 협응 형태를 만들게 되며, 환경이 변화함에 따라 발생하는 균형 문제를 해결한다(김선진, 2003; 김선진·박승하, 2001; Nashner, 1985).

시각 정보는 주변의 물체에 대한 머리의 위치 및 움직임에 따라 신체의 균형과 자세를 제어하는데 필요한 정보를 제공한다. 자기 자신의 운동과 물체의 정확한 형태와 특성을 파악하는 초점시(central vision)보다 주변의 물체와 자극에 대한 정보를 파악하는 데 효율적인 주변시(peripheral vision)가 신체의 균형과 자세 조절에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Shumway-Cook & Woollacott, 1985). 그러나 시각 기관은 항상 정확한 정보만 제공하는 것은 아니다. 예를 들면, 버스에 타고 있는 사람은 버스가 움직이지 않는데도 움직인다는 느낌을 경험한다. 즉 달리던 버스가 정지했을 때 망막에 남아 있는 주변 물체의 움직임에 대한 잔상 때문에 버스가 움직이는 것처럼 느끼게 되는 것이다. 이와 같이 외부로부터 유입되는 시각 정보가 실제 현상과는 전혀 다른 부정확한 정보를 전달할 수 있다는 것이다.

Ⅲ. 자세 조절에 관여하는 기능적 속박

속박(constraint)이라는 개념은 협응구조이론(coordination theory)에서 도입된 것으로 유기체의 행동을 한정시키는 특성이나 경계(boundary)라 할 수 있다. 속박은 유기체와 환경과의 상호작용에 따라 여러 가지 형태로 존재한다. 시간에 따른 속박의 비율은 분석 수준이나 변수에 따라 매우 다양하다. 특정 유기체에 영향을 미치는 속박은 크게 유기체 속박, 과제 속박, 환경 속박 등 세 가지로 구분될 수 있다(McDinnes & Newell, 1982; Newell, 1985).

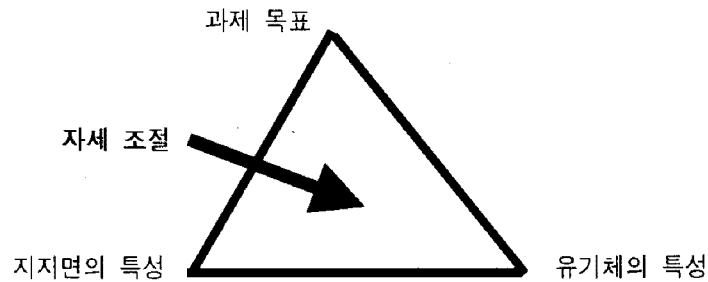


그림 3. 자세조절의 기능적 속박

이러한 개념을 Riccio & Stoffregen(1988)은 자세 조절과 관련지어 적용하였다. 그들의 관점에 따르면 자세 협응은 지지면의 특성, 유기체의 특성, 과제 목표 등에 의하여 속박을 받는다고 주장하였다. 과제 목표는 유기체 행동의 준거를 설정해준다. 인간의 행동은 무언가 나름대로 달성해야 할 목표가 존재하기 때문이다. 유기체의 특성과 지지면의 특성은 목표 달성을 위한 물리적 한계를 설정해준다.

1. 지지면의 특성

인간의 자세조절 전략(strategy)은 지지면의 특성에 영향을 받는다. 지지면의 특성에는 단단한 정도, 마찰력, 기울기, 너비 등이 있다(Horak & Nashner, 1986; Stoffgen & Riccio, 1988). 첫째, 발목 조절 전략의 효율성은 지지면이 얼마나 단단하느냐와 밀접한 관련이 있다. 왜냐하면 표면의 변형이 심하면 발목을 중심으로 토크를 효과적으로 발생시킬 수가 없기 때문이다. 둘째, 발목 부위의 토크 발생이 초기 발목 각도와 관련이 있다면 지지면이 기울기 역시 발목 조절 전략에 영향을 미칠 수 있다. 셋째, 지지면의 너비가 좁으면 발목을 이용한 토크 발생이 불가능하기 때문에 효과적으로 자세조절을 하기 어려워진다. 넷째, 지지면의 마찰이 크지 않으면 지면에 대한 반작용력을 효과적으로 작용시킬 수 없다. 이와 같이 자세 조절은 지지면의 특성에 따라 직접 또는 간접적으로 영향을 받는다.

유기체는 자세조절을 하기 위해 신체의 감각기관을 통해서 지지면에 대한 정보를 획득해야 한다.

앞에서도 언급했지만 자세조절을 위한 전략이나 대응 행동은 지지면의 특성과 밀접한 관련이 있기 때문이다(Stoffregen & Flynn, 1994; Stoffregen & Riccio, 1988). 만약 물렁물렁한 표면에 힘을 가하면 어떻게 될까? 몸이 기울어지면 지면에 힘이 가해지고 표면에는 변형이 생길 것이다. 지지면의 형태가 발바닥을 통해 감지되면 발목 관절의 대응 행동은 지지면의 단단한 정도에 따라 상이하게 나타난다. 어떤 경우에는 신체의 안전성을 도모하기 위하여 발목의 움직임을 제한하고 무릎의 움직임을 통한 자세조절이 행해질 수 있다.

2. 유기체의 특성

유기체의 특성 변화에 영향을 미치는 요인은 매우 다양하다. 특히 성장과 발달은 적절한 협응 유형을 결정하는 것과 직접적인 연관이 있다. 아동의 성장으로 나타나는 중요한 변화는 절대적·상대적 크기의 성장으로 인한 생체역학적(biomechanical) 특성의 변화이다. 자세조절과 이동운동에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나는 신체 분절의 관성능률(moment of inertia)이다. 관성능률 변화에 대응하기 위해서는 유기체의 근력을 증강시켜야 하며 이를 통해서 자신의 신체를 제어하고 협응 시킬 수 있는 적절한 대응 행동이 가능해진다.

3. 과제 목표

과제 목표는 유기체의 행동 양식을 결정하는 데 직접적인 영향을 미친다. 이와 관련되는 것 중의 하나가 주어진 과제를 수행할 때 적용되는 규칙이나 규정이다. 예를 들어 수영 경기에서 자유형, 접영, 평영, 배영 등의 규칙은 과제의 목표를 달성하는데 반드시 준수해야 할 조건이 되는 것이다. 또한 일상생활이나 여러 스포츠 종목에서의 행동 양식은 전래되어온 관습이나 규정에 의하여 결정된다(Riccio, 1993). 즉, 뛰고 달리고 던지는 동작으로 구성된 운동이지만 농구, 핸드볼, 야구 등이 구별되어지는 것은 과제의 목표가 다르고 그에 따른 인간의 행동 유형이 다르기 때문이다.

일반적으로 주어진 상황에서 인간의 행동은 유기체와 환경간의 상호작용에 의해 영향을 받는다. 어떤 환경에서 유기체에게 가능한 행동을 어포던스(affordance)라고 한다(Gibson, 1979; Gibson, 1988). 인식, 인지 학습, 발달 등에서 어포던스는 유기체가 환경에 적응하여 나타내는 행동 양식을 말한다. 바꾸어 말해서, 어포던스는 유기체나 환경적인 특성 어느 한 가지 만을 고려하는 것이 아니라 두 가지 특성이 동시에 작용하여 결정지어지는 것이라 할 수 있다. 같은 환경이라 할지라도 유기체의 특성이 다르면 어포던스도 달라진다. 어포던스는 부정적인 측면과 긍정적인 측면을 가지고 있다. 예를 들면, 직립 자세는 여러 가지 행동을 가능하게 해준다. 직립 자세는 머리의 높이를 최대로 해주어 시야를 넓혀주며 빠르고 효과적으로 이동운동을 할 수 있도록 해준다. 그러나 부정적인 특성으로는 다른 자세보다 넘어질 가능성이 높다는 것이다.

IV. 균형 유지를 위한 자세 제어 전략

전략(strategy)이라는 용어는 지각-인지 결합(perception-action coupling)을 용이하게 하는 신체분절의 협응이나 제어 유형을 표현하는 것이다. 조절 전략은 여러 가지 지각 기관으로 획득한 정보를 통한 신체 분절의 협응 정도에 의존한다. 비슷한 용어로 시너지라는 말이 있는데 이것은 근수축 유형에 관련되는 것이고 전략은 유기체와 환경과의 상호작용의 결과로써 나타나는 행동 유형을 말한다. 전략이 시너지 보다는 포괄적인 의미를 갖는다. 그 이유는 앞서도 언급했지만, 전략은 동작 수행에 필요한 근수축 활동뿐만 아니라 외부 자극에 대한 반응 동작과 관련된 감각기관과의 상호작용을 포함하기 때문이다.

자세 조절은 두 가지 과정의 상호 작용을 통하여 나타난다고 볼 수 있다(Woollacott & Shumway-Cook, 1986). 첫째, 자세 조절은 운동 협응 과정이다. 이것은 조직화된 반응 형태를 보이게 위하여 근육과 관절이 조화롭게 작용하는 것을 의미한다. 따라서 협응은 골격근 체계와 운동 시스템 기능에 따라 그 정도가 달라진다. 둘째, 자세 조절은 감각 통합 과정이다. 이것은 다양한 중추 감각 체계와 말초감각 체계의 상호 작용으로 가능하다.

이와 같이 자세 조절은 감각 체계, 중앙 처리계, 효과계의 상호 작용 속에서 환경 변화에 적절히 대응하며 이루어진다. 감각 체계는 특정 공간상에 있어 신체의 위치 변화 정보를 획득하는 역할을 한다. 중앙 처리계는 감각 정보를 수용·처리하고, 이후 통합하여 주어진 상황에서 가장 적절한 운동 반응을 결정하는 역할을 한다. 그리고 결정된 운동 반응에 따라 동작이 일어나게 되는 근육, 관절 등과 같은 효과계의 기능이 작용한다(김선진·한동욱, 2002). 다시 말해서, 자세 조절은 감각 체계, 중앙 처리계, 효과계의 상호 작용 속에서 신체의 안정성과 정향성의 특징을 통하여 균형을 유지할 수 있는 것이다. 자세 조절에는 두 가지의 전략-1차 제어와 2차 제어-이 있다.

1. 1차 제어 전략

과거에 경험해보지 못한 새로운 환경에서는 유기체가 지지면에 대한 충분한 정보를 가질 수 없다. 이러한 상황에서 선택되는 자세 제어 전략은 고관절과 족관절의 운동을 이용하는 방법이다. 이러한 유형의 전략은 1차 제어 전략이라고 하는데 그 이유는 환경의 변화에 민감하게 반응하지 않는 경향과 고관절과 족관절의 이용한 협응이 적절하지 못한 상황이기 때문이다(Horak, Diener, Nashner, 1989; Riccio & Stoffregen, 1988). 이러한 제어 전략은 지지면의 넓이가 변했을 때 나타나는 경향이 있다고 하였다(Horak & Nashner, 1986). 지지면의 넓이를 발 길이보다 크거나 작게 변화시켰을 때 피험자는 혼합 전략-고관절과 족관절-을 사용하였으나 똑같은 상황을 반복하게 되면 지지면이 좁을 때는 고관절 제어 전략을 사용하였으며 지지면이 넓을 때는 족관절 제어 전략을 사용하였다.

2. 2차 제어 전략

앞에서도 언급했지만, 인간은 주어진 지지면에 대한 적응이 이루어지면 특정 전략으로 수렴하는 경향이 있다. 이러한 현상이 나타나는 것은 인간이 적응 조절 시스템(adaptive control system)과 유사하기 때문이다. 변화된 환경에 따라 인간의 자세 조절의 적응이 이루어지는 이유는 인간이 주어진 환경에서 조절의 효율성을 극대화하려고 애쓰기 때문이다. 바꾸어 말해서 인간은 주어진 목표 달성을 위하여 가능한 한 힘을 작게 쓰고 에너지 소비를 최소화하려고 하기 때문이다(Newell, 1985).

가장 효율적인 제어 전략이 모든 상황에서 같을 수 없다. 그렇다면, 인간은 주어진 상황에서 가장 효율적인 제어 전략을 어떻게 선택하는 것인가? 하는 의문이 제기될 수 있다. 중추신경계의 반응 과정을 완전하게 설명할 수 없지만, 인간은 매우 짧은 순간에도 여러 가지 전략들을 탐색 비교한 후 가장 효율적인 제어 전략을 선택할 수 있는 기전을 가지고 있다고 할 수 있다(Riccio & Stoffregen, 1988).

V. 자세와 수행능력

Riccio(1993)는 여러 가지 과제에서 수행능력은 유기체의 자세나 동작에 의해 영향을 받지만 과제는 반드시 신체 정위(body configuration)나 동작의 관점에서 규정될 필요가 없다고 주장하였다. 예를 들면, 자세는 눈과 물체가 얼마나 가까이 있느냐 또는 물체가 접근 가능한 거리에 있느냐에 따라 영향을 받는다는 것이다. 따라서 시각 조절 또는 수조절을 통한 수행능력은 자세의 효율성을 평가하는 함수로써 사용될 수 있다. 앞에서도 언급했지만, 자세 유지를 위해 최소한의 에너지가 요구되는 신체 정위는 신체 정위공간 좌표계의 원점이나 허용 영역에 해당한다(Matin, 1990; Riccio & Stoffregen, 1988).

만약 최소의 노력이 유일한 목표라면 인간은 신체 정위를 자세 평면의 원점에 유지하려고 할 것이다. 그러나 주어진 과제 목표를 달성하기 위해서 효과적인 신체 정위가 에너지 소모의 효율성과 일치하지 않는 경우도 있다. <그림 4>에서 보는 것처럼 인간은 가능한 한 편한 자세 즉 에너지 소비를 최소화 하는 자세를 취하려고 하는 경향이 있으나 주어진 과제 목표에 따라 비교적 에너지 소모가 많은 자세를 취하는 경우가 발생한다. 실제로 스포츠 장면에서는 효율적인 자세와 과제 목표 달성이라는 두 가지 특성을 만족시키기 위해 노력해야 하는 경우가 대부분이다. 바꾸어 말하면, 서로 다른 과제 목표는 신체 정위에 속박을 가하는 원인이 된다고 할 수 있다. <그림 5>는 과제 목표와 자세와의 관계를 개략적인 그래프로 나타낸 것으로써 과제의 목표에 따라 자세가 갖는 특성이 다르다는 것을 보여준다. 이와 같이 자세 조절의 측면에서 볼 때 과제 목표 달성과 에너지 소모의 효율성이 상호 교환(trade-off) 관계에 있다고 할 수 있다(Hancock & Newell, 1985).

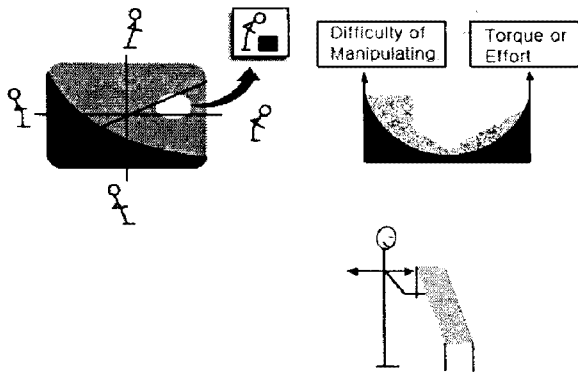


그림 4. 효율성과 자세

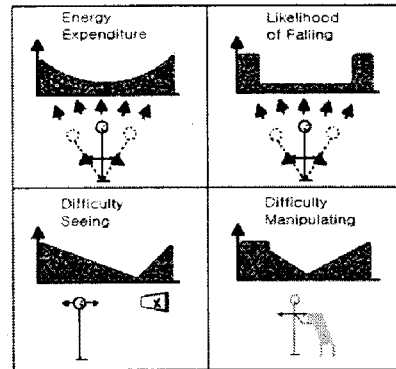


그림 5. 과제목표와 자세

자세와 다른 행동간의 협응은 운동이나 과제 수행에 있어 매우 중요한 것이다. 인체는 연쇄계로 이루어져 연속되는 분절간의 상호작용이 끊임없이 이루어지기 때문이다(Riccio, 1993). 이러한 힘을 관성력(inertial force)이라고 하는데 그것은 신체 분절의 방향과 운동에 의해 영향을 받는다. 예를 들어 발을 움직이지 않은 상태에서 허리를 굽혀 피아노를 치는 과제가 주어졌을 경우 인간은 과제 목표 달성을 극대화시키기 위하여 신체 분절을 협응 시킨다는 것이다. 바꾸어 말해서, 과제 목표 달성을 위한 신체 정위에 따라서 인간은 적정 제어 전략을 선택한다고 할 수 있다. <그림 6>은 고관절-족관절의 움직임이 머리의 위치 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 보여주고 있다. 고관절의 회전은 족관절의 회전보다 상대적으로 큰 머리의 움직임을 야기한다. 즉, 고관절 회전에 의한 머리의 움직임은 보다 큰 시각적 보상이 요구된다는 것이다.

신체 정위가 과제 수행능력에 어떠한 미치는 연구 결과 인간은 직립 자세에서 주어진 과제를 수행하는 경우 가능한 한 균형을 잃지 않으려고 하면서 목표 달성에 효율적인 신체 정위를 선택한다고 하였다(Zhang, Drury, & Wolley, 1991). 일반적으로 인간은 과제 목표 달성을 위하여 특정 자세를 취하게 된다는 것이다. 이러한 아이디어는 스포츠 종목에도 적용되는데, 어떤 스포츠에서든지 특정 신체 정위나 균형은 수행능력을 극대화시키는데 매우 중요하다. 100미터 달리기 출발을 할 때 선수들은 매우 비효율적인 신체 정위를 갖는데 그 이유는 그러한 자세가 반응시간을 최소화하여 출발을 효과적으로 해주기 때문이다. 반대로, 양궁이나 사격 종목에서는 가능한 한 안정되고 에너지 소모가 적은 자세를 취하는데 이것은 고관절-족관절 평면의 원점에 가까운 신체 정위이다. 결론적으로 신체 정위와 수행능력 사이에는 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.

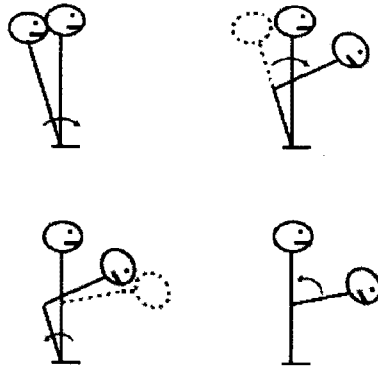


그림 6. 측관절과 고관절의 운동과 머리의 위치 변화

운동 수행능력을 향상시키기 위해서는 인간과 환경간의 상호작용에 대한 정보의 교환이 빠르고 정확하게 이루어져야 한다. 대부분의 스포츠가 인간과 물체 또는 환경과의 상호작용을 통해 행해진다는 점을 감안한다면 환경적인 측면과 독립적으로 인간의 행동을 이해한다고 하는 데는 많은 문제점이 있다. 양궁에서의 자세와 육상에서 출발 자세는 안정성의 관점에서는 상반되는 점이 있으나 수행능력의 극대화란 측면에서는 공통점이 있다. 인간의 신체정위나 자세제어 전략은 유기체의 특성과 과제목표에 의해 가장 적절하게 적응(adaptation)되어진다는 것이다. 적응을 위해서는 탐색행동(exploratory behavior)이 필요한데 이것은 유기체의 정보 획득 능력에 의해 영향을 받는다(Lee, 1994).

<그림 7>은 유기체의 행동이 자세조절 형태에 어떻게 적응해가는지를 보여준다. 안정된 자세를 유지할 수 있을 정도의 외력(넘어지지 않을 정도의 자극)이 작용하는 경우(a), 처음에는 수행능력이 저하되다가 어느 정도 적응이 이루어지면 다시 원래의 수행능력 수준을 유지한다. 안정된 자세를 유지할 수 없을 정도의 큰 힘(본래의 자세를 유지하기 어려운 정도의 자극)이 작용하면(b), 과제 목표 달성을 위한 행동이 일시적으로 불가능해지고 안정된 자세를 다시 취한 후 과제를 계속한다. 어떤 경우에는 외력이 연속적으로 유기체의 안정을 방해할 수 있는데(c), 이 경우에는 소기의 과제목표 달성이 어려워지고 보다 낮은 수행능력을 나타낸다(예, 바늘에 실을 꿰려고 할 때 다른 사람에게 방해 받는 경우).

인간이 행하는 대부분의 동작들은 과제 목표의 달성과 효율적인 자세유지라는 두 가지 조건(dual task)을 충족시켜야 하는 경우가 대부분이다(Riccio, 1993; Lee, 1994). 골프샷을 하는 경우 골퍼는 원하는 목적 달성을 위하여 신체를 움직여야 하지만 안정성을 확보하지 못하면 공을 원하는 지점에 보낼 수 없게 된다. 마찬가지로 사격을 하는 경우 안정성의 유지와 운동수행 능력의 극대화라는 두 가지 요구 조건을 충족시켜야만 좋은 성적을 기대할 수 있게 된다. 이와 같은 개념은 운동뿐만 아니라 일상 생활에도 적용될 수 있는 일반적 특성을 지니고 있다

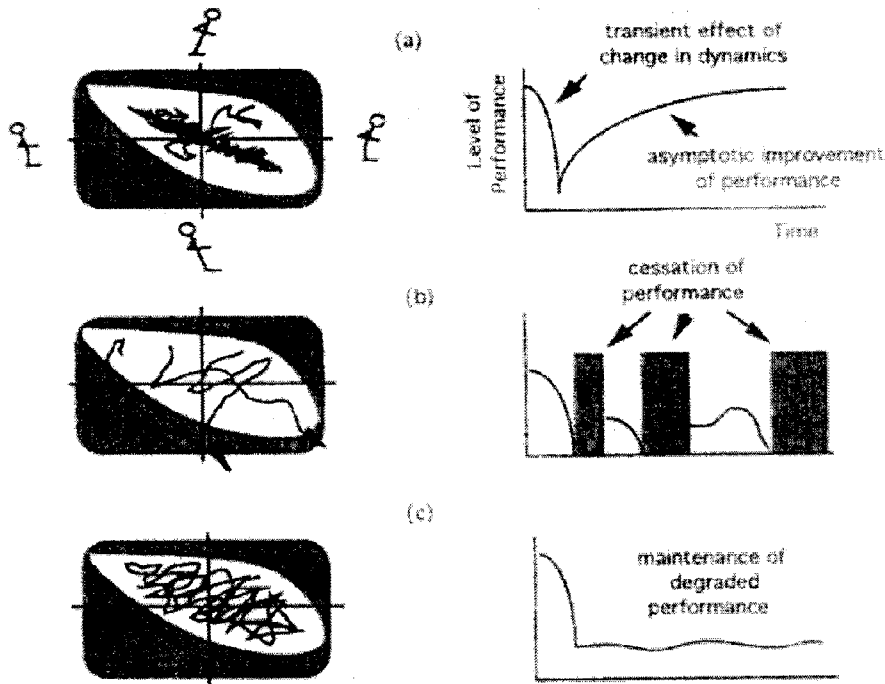


그림 7. 외부 자극에 대한 자세 조절의 형태(adapted from Lee, 1994)

VI. 결 론

직립자세는 몸전체의 질량이 발에 의하여 지지되는 상태이다. 이러한 자세를 유지하기 위해서는 신체에 작용하는 중력과 관성력의 총화(sum of gravito-inertial forces)와 같은 크기이며 방향이 반대인 힘이 인간과 지지면이 접촉하고 있는 부분에 작용해야 한다(Riccio & Stoffregen, 1988). 균형된 자세를 취하기 위해서는 신체의 무게중심을 발바닥안에 위치시키도록 지면에 힘을 가해야 한다. 인간의 신체는 수많은 분절로 구성되어 있기 때문에 몸의 균형을 유지하는데 여러 가지 방법이 이용될 수 있다. 일반적으로 외력이 작용하지 않는 경우, 신체분절을 중력선에서 벗어나지 않도록 해야 한다. 만약 신체의 어느 분절이라도 중심선에서 벗어나게 되면 토크가 발생하게 되며, 이것은 신체 중심선을 변경시키기 때문이다.

안정된 자세는 복잡한 운동기능 수행에 필수적인 것이며 인간에게 있어서는 복잡한 신경계의 작용이 수반된다(Barin, 1989; Horak & Nashner, 1986). 따라서, 시각, 전정기관, 체감각기관 등과 같은 자세 조절과 관련된 정보들을 통합하여 조직화하는 과정이 필수적으로 요구된다. 다시 말해서 자세 조절을 하거나 협응된 동작을 실시하는 데에는 환경에 관련된 정보를 받아들이는 시각, 머리의 위치를 감지하는 전정기관, 신체분절의 상대적인 위치나 환경에 대한 위치를 인지하는 체감각기관 등의

기능이 필요하다는 것이다(Owen & Lee, 1986; Stoffregen & Riccio, 1988).

인체는 강체로 된 분절들이 관절에 의하여 고리처럼 연결된 형태를 취하고 있다. 따라서 신체의 어느 한 분절에 작용한 근력이나 외력은 inertial coupling forces를 통해 다른 분절에 영향을 미치게 된다(Barin, 1989; Kugler & Turvey, 1987). 정상 직립 자세에서 신체 분절은 발목관절 위에 무게 중심선이 위치하는 똑바른 자세를 보여준다. 그 결과, 중력으로 인한 토크가 크게 필요하지 않는 상태를 유지하게 되며 이러한 상태를 자세조절 시스템이 중력에 대하여 평형(equilibrium) 상태에 있다고 말한다(Nashner & McCollum, 1985; Riccio & Stoffregen, 1988). 만약 외력이 작용하지 않는다면 인간에 의한 보상행동(compensatory movement)이 일어나지 않지만 신체의 한 분절의 위치가 무게 중심선에서 멀어지게 되면 이를 보상하기 위한 에너지가 필요하게 된다.

다분절로 이루어진 인간의 자세조절 시스템은 다양한 형태의 협응 형태를 나타낸다. 왜냐하면 어느 한 분절의 움직임이 다른 분절에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 똑같은 자세를 취하는 경우에도 서로 다른 신체 분절의 움직임이 있을 수 있기 때문이다. 앞에서도 언급했듯이 인간의 자세조절은 유기체, 환경, 과제 등의 특성이 변함에 따라 상이한 반응을 보여준다. 최적의 자세 형태는 이들 세 가지 요인의 상호작용의 결과 나타난다(Horak & Nashner, 1986).

복잡한 시스템인 인간의 자세조절은 신체분절에 대한 상대적인 위치를 유지하는 것뿐만 아니라 주어진 과제를 수행하기 위하여 미세한 조절반응을 필요로 하기도 한다. 본 연구에서는 인간의 자세조절과 관련된 여러 가지 요인들에 대하여 체계적이고 세밀하게 고찰하는데 주안점을 두었다.

참고문헌

- 김선진 (2203). *운동발달의 이해*. 서울: 서울대학교 출판부.
- 김선진·박승하 (2001). 동적 자세 조절 능력의 발달 단계적 분석. *한국스포츠심리학회지*, 제12권 2호, 13-23.
- 김선진·한동욱 (2002). 자세유지의 발달적 조절 전략에 관한 연구. *한국체육학회지* 제11권 5호, 827-836
- Barin, K. (1989). Evaluation of generalized model of human postural dynamics and control in the sagittal plane. *Biological Cybernetics*, 61, 37-50.
- Berstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movements*. New York: Pergamon Press.
- Diener, H. C., Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1988). Influence of stimulus parameters on human postural responses. *Journal of Neurophysiology*, 59(6), 1888-1903.

- Droulez, J. (1988). Topological aspects of sensory-motor control. In V. S. Gurfinkel, M. E. Lotte, & J. Massion (Eds.), *Stance and motion: Facts and concepts* 251-259.
- Gibson, E. J. (1988). Exploratory behavior in the development of perceiving, action, and the acquiring of knowledge. *Annual Review of Psychology*, 39, 1-41.
- Gibson, E. J., Riccio, G. E., Schmuckler, M. A., & Stoffregen, T. A. (1987). Detection of the traversability of surfaces by crawling and walking infants. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 533-544.
- Gibson, E. J. & Schmuckler, M. A. (1989). Going somewhere: An ecological and experimental approach to development of mobility. *Ecological Psychology*, 1, 3-25.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA; Houghton-Mifflin.
- Haken, H. (1983). *Synergetics: An introduction: Nonequilibrium phase transitions and self organization in physics, chemistry, and biology*. Berlin, Heidelberg, & New York: Springer Verlag.
- Haken, H. (1987). *Chaos and order in nature*. New York: Springer-Verlag.
- Hancock, P. A., & Newell, K. M. (1985). The movement speed-accuracy relationship in space time. In H. Heuer, U. Kleinbeck, & K. H. Schmidt (Eds.), *Motor behavior: Programming, control, and acquisition*, 153-188. Berlin: Springer-Verlag.
- Horak, F. B., Diener, H. C., & Nashner, L. M. (1989). Influence of central set on human postural responses. *Journal of Neurophysiology*, 62(4), 841-853.
- Horak, F. B. & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: Adaptation to altered support surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6), 1369-1381.
- Kelso, J. A. S. (1990). Phase transitions: Foundations of behavior. In H. Haken, & M. Stadler (Eds.), *Synergies of cognition*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergences. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior*, 3-41. North Holland: Elsevier Science Publishers.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1982). On the control and coordination of naturally developing systems. In J. A. S. Kelso & J. E. Clark (Eds.), *The development of movement control and coordination*, 5-78. John Wiley & Sons Ltd.
- Kugler, P. N. & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law and the self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Publish.
- Lee, D. (1994). Topological relations between postural configuration and manual control performance. *Doctoral dissertation*, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.

- Martin, E. J. (1990). An information based approach in postural control: The role of time-to-contact with stability boundaries. *Unpublished master's thesis*, University of Illinois at Urbana -Champaign.
- McCollum, G. & Leen, T. K. (1989). Form and exploration of mechanical stability limits in erect stance. *Journal of Motor Behavior*, 21, 225-244.
- Nashner, L. M. & McCollum, G. (1985). The organization of human postural movements: A formal basis and experimental synthesis. *The Behavioral and Brain Science*, 8, 135-172.
- Nashner, L. M. & Wollacott, M. (1979). The organization of rapid postural adjustments of standing human: In R. E. Talbott, & D. R. Humphrey (Eds.), *An experimental and conceptual model: In Posture and movement*. New York: Raven Press.
- Nashner, L. M., Wollacott, M., & Tuma, G. (1979). The organization of rapid responses to postural and locomotor like perturbations of standing man. *Experimental Brain Research*, 36, 463-476.
- Newell, K. M. (1985). Coordination, control and skill. In R. B. Wilberg & I. M. Frank (Eds.), *Differing perspective in motor learning, memory and control*, 295-317. North Holland: Elsevier Science Publishers.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control*, 341-371. Boston, MA: Martinus Nijhoff.
- Newell, K. M., van Emmerik, R. E. A., Lee, D., & Sprague, R. L. (1993). On postural stability and variability. *Posture and Gait*, 1(4), 225-230.
- Owen, B. M. (1986). Establishing a frame of reference for action. In M. G. Wade & H.T.A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control*, 207-308. Martinus Nijhoff.
- Reed, E. S. & Jones, R. (1982). *Reasons for realism: Selected essays of James J. Gibson*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Asso. Inc.
- Riccio, G. E. (1993). Information in movement variability about the qualitative dynamics of posture and orientation. In K. M. Newell (Ed.), *Variability and motor control*, 317-357. Champaign, IL: Human Kinetics Press.
- Riccio, G. E. (1993). Multimodal perception and multi-criterion control of nested systems: Self motion in real and virtual environments. *Technical report in the Beckman Institute for Advanced Science and Technology*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Riccio, G. E., Lee, D., & Martin, E. J. (1993). Task constraints on postural control. *Proceedings of*

- the Seventh International Conference on Event Perception and Action*. Vancouver: Canada. International Society for Ecological Psychology.
- Riccio, G. E., Martin, E. J., & Stoffregen, T. A. (1992). The role of balance dynamics in the active perception of orientation. *Journal of Exp. Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 624-644.
- Riccio, G. E. & Stoffregen, T. A. (1988). Affordances as constraints on the control of stance. *Human Movement Science*, 7, 265-300.
- Shumway-Cook, A. & Woollacott, M. H. (1985). The growth of stability: Postural control from a developmental perspective. *Journal of Motor Behavior*, 17(2), 131-147.
- Stoffregen, T. A. (1985). Flow structure versus retinal location in the optical control of stance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, 554-565.
- Stoffregen, T. A. & Flynn, S. B. (1994). Visual perception of support surface deformability from human body kinematics. *Ecological Psychology*, 6(1), 33-64.
- Stoffregen, T. A. & Riccio, G. E. (1988). An ecological theory of orientation and the vestibular system. *Psychological Review*, 96(1), 3-14.
- Woollacott, M. H. & Shumway-Cook, A. (1986). *The development of the postural and voluntary motor control systems in Down's syndrome children*. In M. G. Wade (Ed.), *Motor skill acquisition of the metally handicapped*, 45-71. Amsterdam: Elsevier.
- Zhang, L., Drury, C. G., & Woolley, S. M. (1991). Constrained standing: Evaluating the foot/floor interface. *Ergonomics*, 34(2), 175-192.

투 고 일 : 2005. 02. 15

심 사 일 : 2005. 02. 23

심사완료일 : 2005. 02. 28