

4 각보행로봇의 기계적 에너지 소모량

홍형주 김진연 윤용산
(한국과학기술원)

MECHANICAL ENERGY CONSUMPTION OF A FOUR-LEGGED WALKING VEHICLE

H.J. HONG, Z.Y. KIM, Y.S. YOON
KORBA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Abstract

In this study, a pantograph leg of the four legged walking vehicle is analysed with regard to mechanical energy consumption. Energy efficiency of the vehicle is estimated in terms of specific resistance varying body height, stride length and walking speed. The interaction between specific resistance and the parameters is investigated.

1. 서론

무른지형, 가파른 경사지 그리고 요철이 심한 지형에서 동물들은 바퀴나 트랙이 달린 차량보다 훨씬 적은 에너지를 사용하여 움직인다. 또한 그러한 험지에서 동물들의 기동성은 다른차량에 비해 월등히 우수하다. 이러한 이유들로부터 보행로봇에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 현재까지 개발되어 있는 보행로봇은 하중반응력이 미약하며 보행속도가 느리고 많은 동력이 소요되며 제작비용이 상당히 비싼 문제점이 있다. 특히 보행로봇은 에너지 공급원을 몸체에 지니고 다녀야 한다. 그러므로 지금까지 일정한 곳에 고정되어서 사용되던 산업용 로봇의 제작시 크게 고려되지 않았던 에너지 효율이 중요한 문제로 부각된다.

보행로봇의 에너지 효율에 크게 영향을 미치는 것은 다리의 형상이며[1] 여러가지 조건이 고려되어야 한다. 평지보행시 다리의 발끝이 몸체에 대하여 평행운동을 할수 있어서 몸체의 높이 변화로 인한 위치에너지의 손실이 없어야 하며 또한

이 때 필요한 Actuator수를 가능한한 줄임으로서 상당한 에너지의 소모를 줄일 수 있겠다. 보행로봇의 다리에 사용되는 기구는 조인트로 연결한 단순한 2개의 링크, 4절, 6절의 직선기구 [2] 그리고 Pantograph 기구가 사용되어왔다. 같은 기구이더라도 몸체의 높이, 보폭, 보행속도에 의해 소모되는 에너지의 양은 차이가 있다. 삼사육을 사용하여 회전조인트(Revolute Joint)로 연결된 2개의 링크를 다리기구로 갖는 보행로봇에서 에너지 소비량을 계산한 연구가 발표된 바 있다[3]. 그러나 다리의 형상에 따라 에너지 소비량이 크게 달라지는 점을 고려한다면 이 결과는 모든 다리기구에 적용할 수 없다. 이 연구에서는 Pantograph기구를 다리로 사용 하는 보행로봇의 경우 몸체의 높이, 보폭, 그리고 보행속도에 따른 에너지 소비를 Specific Resistance[5]로 표시하고 그 경향을 고찰하는 것을 목적으로 한다.

2. Pantograph 기구

Pantograph기구는 거의 400년 동안이나 직선발생기구와 곡선확대기구로 알려져왔다. 그림 1 은 Pantograph를 표시한 것이다. 점 Q가 고정되면 A가 그리는 궤적은 B점에서 $(R=BQ/AQ)$ 배 만큼 확대되어 나타난다. 점 A가 고정되면 B점의 궤적은 A가 그리는 곡선의 $(1+R)$ 배 만큼 확대되어 나타난다. 이 기구는 B점이 몸체에 상대적으로 정확한 직선운동을 할 수 있어서 로봇의 보행시

물체의 상하운동으로 인한 위치에너지 손실을 제거할 수 있다. 또한 A와 Q점을 각각 수평 수직 운동을 시키면 B의 운동은 A와 Q의 운동으로 분리된다. 이러한 특징은 간단한 기구를 다리로 사용하였을때 생기는 많은 시간이 소비되는 기구학적 해석을 피할 수 있다.

3. 기구학적 해석

Pantograph기구는 4개의 링크가 4개의 회전연결부(Revolute Joint)로 결합된 2 자유도를 갖는 기구이다. 그림1의 A,Q점에서 원하는 속도로 수평, 수직 구동 하였을때 각 조인트에 작용하는 힘과 구동하는데 필요한 동력을 계산하는 데는 우선 Pantograph의 기구학적 해석과 더불어 역동역학(Inverse Dynamic)적 해석이 필요하다.

(1) 위치해석

회전연결부는 링크 i와 링크 j에 공통인 점 P를 중심으로 상대적 회전운동을 하는 것으로 물리적으로는 두 링크간의 회전배어링이다. 이 조인트는 각각의 극소좌표에 대하여 S_i 로 정의되는 링크 i상의 P_i , S_j 로 정의되는 링크 j상의 P_j 점으로 정의된다. 이 조인트의 구속방정식(Constraint Equation)은 P_i 와 P_j 가 일치해야하는 조건에서 다음과 같은 식으로 얻어진다.

$$x_i + S_i^p - x_j - S_j^p = 0 \quad (1)$$

이 식을 풀어서 다시 쓰면

$$\phi^r = \begin{bmatrix} x_i + x_i^p \cos \phi_i - y_i^p \sin \phi_i \\ -x_j - x_j^p \cos \phi_j + y_j^p \sin \phi_j \\ y_i + x_i^p \sin \phi_i + y_i^p \cos \phi_i \\ -y_j - x_j^p \sin \phi_j - y_j^p \cos \phi_j \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

또한 링크 i상의 한점 P를 원하는 대로 구동하는 것은 다음과 같은 식으로 표시한다.

$$\begin{aligned} x_i + x_i^p \cos \phi_i - y_i^p \sin \phi_i - f(t) &= 0 \\ y_i + x_i^p \sin \phi_i + y_i^p \cos \phi_i - g(t) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

구하고자 하는 Pantograph기구의 위치는 회전연결부에 대한 8개(2*4), A,Q점을 구속하는 4개의 방정식을 합해 12개의 구속방정식으로 이루어진다. 식 (4)의 12개의 비선형방정식은 Newton-Raphson Method를 사용하여 해를 구할 수 있다.

$$\phi(q)_{12 \times 1} = 0 \quad (4)$$

(2) 속도 및 가속도 해석

식 (4)를 시간 t에 대하여 미분하면

$$\phi_q \dot{q} = -\dot{\phi}_t = v \quad (5)$$

여기에서

$$\phi_q = \frac{\partial \phi(q,t)}{\partial q_j} \quad n_c \times n_c$$

n_c = 구속방정식의 수

$|\phi_q| \neq 0$ 면 \dot{q} 에 대한 유일한 해를 구할 수 있다. 앞의 속도방정식을 시간에 대해 1번 더 미분하면

$$\phi_q \ddot{q} = -(\phi_{qq} \dot{q})_q \dot{q} - 2\phi_{qt} \dot{q} - \phi_{tt} = \gamma \quad (6)$$

이 곳에서도 $|\phi_q| \neq 0$ 이면 \ddot{q} 에 대한 유일한 해를 구할 수 있다.

(3) 역동역학적 해석

구속을 받는 기계 시스템의 운동방정식에서 그 시스템의 기구학적 자유도와 구동구속조건의 수가 같으면 위치, 속도, 가속도를 구할 수 있고 이 경우 Jacobian 은 full rank 행렬이다. 구속조건을 갖는 동역학적 시스템의 운동방정식은

$$M\ddot{q} + \phi_q^T \lambda = 0, \quad \phi_q \ddot{q} = \gamma \quad (7)$$

로 표시 될 수 있다. $|\phi_q| \neq 0$ 이므로

$$\lambda = \phi_q^{-1T} [0 - M\ddot{q}] \quad (8)$$

여기에서 Lagrange Multiplier λ 는 system에 작용하는 힘 즉 각각의 구속조건을 만족시키기위해 시스템에 작용하는 힘으로 설명된다.

4. Specific Resistance

Specific Resistance는 보행로봇의 에너지 효율을 평가하는 지표로 사용된다. Specific Resistance는 어떤 단위중량의 물체가 단위거리를 움직이는데 사용되는 에너지와 그 물체를 중력의 반대방향으로 이동시킬 때 소요되는 에너지의 비로 표시된다. 이 값이 무차원수로 표시되기 때문에 Specific Resistance가 작을수록 보행로봇의 성능이 우수하다고 할 수 있다. Specific Resistance를 식으로 표시하면

$$\epsilon = \frac{E}{WV} = \frac{PE}{WS} \quad (9)$$

여기에서 E : 소모된 에너지 V : 이동속도 S : 이동거리 ϵ : Duty Factor W : 차량의 무게 이다.

5. 에너지 소모량

보행로봇의 보행속도, 보폭, 몸체의 높이 등이 Specific Resistance에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위해서 각 다리에 2 자유도를 갖는 4각 보행로봇에 대하여 해석한다. 문제를 간단히 하기 위해서 다음과 같은 가정을 도입한다.

- Actuator가 소비하는 동력은 다리가 일정한 속도를 내기 위해 사용되는 것으로 정의 되고 $P = F \cdot v$ 로 표시된다. 여기에서 P는 동력이며 F는 힘, v는 속도이다.
- 로봇의 몸체는 위치에너지의 손실없이 일정한 속도를 유지하며 수평운동을 한다.
- 다리를 옮길때 발끝은 지면에 거의 붙어서 움직인다.
- 수평력은 0이다.
- 지면에서 다리에 작용하는 반발력은 좌우측 동일하다.
- 각 조인트에 작용하는 마찰력은 무시한다.

일반적인 보행로봇의 경우 1 개의 다리당 3개의 자유도가 필요하지만 Specific Resistance를 계산하기 위해 본 연구에서 사용한 다리는 2개의 자유도를 갖는다. 나머지 1개의 자유도는 장애물을 만났을 때 방향전환을 하기위해 필요하다. 첫번째

가정은 로봇이 일정한 속도를 유지하기 위해서 Actuator를 능동적으로 제어하는데 필요한 동력을 계산한 것으로 - 의 일도 에너지 소비의 한 형태로 포함 시켰다. 나머지 가정들은 해석의 간편함을 위해 도입한 것이다. 다리에 대한 지면의 반발력은 수평력의 경우 몸체를 받치고 있는 다리가 3개 이상일 경우 구할 수 없다.

본 연구에서는 Waldron[5]의 연구에서와 같이 발끝의 수평력을 모두 0으로 놓고 Kaneko[3]가 다리의 수직반발력을 Pseudo-Inverse Method를 사용하여 구한 것처럼 몸체와 다리의 무게의 합을 다리에 나누어 작용시키는 방법을 사용하였다. 그러나 다리의 수직방향 관성력은 지면의 반발력을 구하는 데 고려하지 않았다. 지면에 대한 반발력은

$$\begin{aligned} V_{2i} &= W/2n_1 \\ V_{2i-1} &= W/2n_2 \quad i=1, \dots, N/2 \\ H_i &= 0 \quad i=1, \dots, N \text{ (다리의 수)} \end{aligned} \quad (10)$$

로 표시된다. 여기에서 n_1, n_2 는 좌우편에서 각각 몸체를 지탱하는 다리의 갯수 이다. 4각 보행로봇의 경우 정적으로 안정한 걸음걸이는 duty factor가 3/4이상일 경우이고 3/4이하이면 뒹굴음이 시작된다. 본 연구에서 도입한 가정으로는 duty factor 3/4이하의 뒹굴음의 경우들을 정확하게 해석 할 수 없다. 이후의 모든 해석에서는 정적으로 안정한 duty factor 3/4인 경우만을 다룬다. 4 각 보행로봇의 경우 duty factor 를 β , 보폭을 S, 1걸음의 주기를 T, 보행 속도를 V라고 하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$V = \frac{S}{\beta T} = \frac{4S}{3T} \quad (11)$$

또 다리의 운동상태를 이동상태(transfer phase)와 지탱상태(support phase)로 구분하면 각각의 상태가 한주기 동안 차지하는 시간과 그 때 다리의 몸체에 대한 상대속도는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{array}{ll} \text{이동상태} & (1-\beta)T \quad \beta/(1-\beta)V \\ \text{지탱상태} & \beta T \quad -V \end{array} \quad (12)$$

보행로봇이 1주기 T동안 움직이는 것을

해석하는 것은 4개의 Pantograph기구를 2가지 상태로 구분하여 해석하는 문제가 된다. 여기에서 문제가 되는 것은 다리의 운동방향이 바뀔때 그 운동에너지 손실은 직접적으로 계산되지 않는 것이다. 즉 역동역학적 해석에서는 주어진 위치, 속도, 가속도를 만들어내기 위해 한순간에 각 조인트와 Actuator에 걸리는 힘만을 계산하므로 시간에 대한 속도곡선을 아무리 매끈하게 하여도 이 문제는 해결되지 않는다. 본 연구에서는 속도가 바뀌는 순간에 다리의 운동에너지를 계산하여 총에너지 손실에 더해줌으로서 이 문제를 해결하였다. 그러나 이때 Actuator에 작용하는 힘은 실제적으로 구할 수 없다.

에너지효율을 간접적으로 나타내는 Specific Resistance를 구하는데 사용되는 에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$E_{tot} = \int_0^{T_{end}} |F_1 \times v_1| dt + E_{lost} \quad (13)$$

여기에서 -의 일도 에너지소비의 한 형태로 본 것은 몸체의 속도를 일정하게 유지시키기 위한 것이다. 만일 -의 일을 소모된 에너지에 포함시키지 않으면 그 때에 Actuator는 로봇트의 보행속도를 능동적으로 제어할 수 없으며 일정한 속도를 유지하는 가정은 더이상 성립하지 않는다.

위에서 언급한 내용을 요약하여 컴퓨터를 사용하여 계산하는 과정은 그림 3의 흐름도에 표시하였다.

6. 결과 및 고찰

본연구에서 해석하는 Pantograph기구의 자세한 치수는 다음과 같다.

AB=6Ccm, AB=36cm, QB=10cm, QD=30cm, CD=10cm, CB=60cm

이 기구는 Q의 수평운동을 6배, A의 수직운동을 5배로 확대시킨다. 이 기구를 사용하는 보행로봇트는 최대속도 1m/s를 목표로 연구가 진행되고 있으며 이 치수들은 최대속도의 조건을 만족시킨다. 기구의 크기가 정해지면 기구의 작업

환경에 따라 보행로봇트의 에너지 소비는 크게 차이가 날 수 있다. 여기에서는 위에서 주어진 기구를 가지고 몸체의 높이, 보행속도, 보폭을 변화시키면서 에너지소비량을 Specific Resistance를 통해서 간접적으로 평가하고 연구중인 로 봇트에 적합한 작동환경을 조사 검토한다.

(1) 몸체의 높이

그림(4)은 보폭을 60cm, 보행속도를 1m/s로 할때 기구의 높이를 조정하면서 Q점을 구동하는 Actuator가 한 주기동안 내는 힘의 최대값과 Specific Resistance를 표시한 것이다. 물론 이 힘은 다리의 운동방향이 바뀔 때 Actuator가 내는 힘은 아니다. 이 최대값은 다리의 운동방향이 바뀔 때의 값이고 또한 이때 다리가 갖고 있는 운동에너지도 최대가 되며 에너지 소비의 주된원인은 이 때의 값이다.

그림을 살펴보면 몸체가 너무 높거나 낮을 경우 힘과 에너지 소비량이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이것은 Kaneko[3]가 그의 연구에서 보행로봇트의 다리의 형태가 포유동물형(Mammal Type)일 때는 몸체의 위치가 높을 수록 다리의 형태가 곤충형(Insect Type)일 경우는 몸체가 낮을 수록 에너지 소비량이 적어진다고한 것과는 반대의 결과를 나타낸다.

Pantograph기구는 평면에서 움직일 때 다리의 높이를 조정할 필요가 없고 단지 Actuator Q만을 움직여서 보행 할 수 있다. 또한 Pantograph기구는 수평, 수직 운동이 서로 분리(Decoupled)되어 있기 때문에 중력에 의한 영향은 수평운동에 전혀 나타나지 않는다. Kaneko가 해석한 다리기구는 두개의 링크가 회전연결부 로 연결되어 있기 때문에 링크의 운동시 중력때문에 생기는 Moment가 에너지 소비량에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 그러기 때문에 Moment Arm이 길어 질 수록 즉 몸체의 높이가 중간정도에 가까울수록 Specific Resistance 가 커진다고 생각된다.

(2) 보폭

그림(5)는 다리의 보행속도를 1m/s, 몸체의 위치를 75cm로 하고 보폭을 변화시키면서 한 주기동안의 최대힘과 Specific Resistance를 표시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 몸체의 높이가 60cm 인 근방에서 최대힘이 증가하기 시작하고 Specific Resistance는 보폭이 커질수록 점차적으로 감소한다. 또한 감소하는 비율은 보폭이 커질 수록 작아진다.

Actuator에 작용하는 힘은 대체로 기구의 운동에너지의 변화량에 밀접한 관계가 있다. 다리의 위치에 따라 기구의 관성모멘트는 변화한다. 다리의 위치가 앞과 뒤의 끝에 있을수록 관성모멘트는 커지고 중간위치에 가까울 수록 관성모멘트는 작아진다. 일정한 속도로 다리를 구동시킬 경우 전체적인 다리의 운동에너지는 증가-감소-증가-손실-증가-감소-증가-손실 의 과정을 반복한다. 운동에너지가 감소하다가 증가하는 경우 Actuator에서 공급하는 에너지(힘)이 증가하기 시작하는데 보폭이 커지면서 관성모멘트의 변화가 커지고 기구의 운동도 각각의 링크가 빠른 속도로 움직이기 시작하기 때문에 운동에너지의 변화가 급격하게 된다. 이 기구에서는 보폭이 약

60cm인 근방 에서 이러한 변화가 생기기 시작하는 것으로 보인다.

보행로봇의 에너지 소비형태는 다리의 운동중 운동에너지 변화로 인한 소비와 다리의 운동이 바뀔 때의 소비로 크게 나눌 수 있다. 보폭이 커지면 첫번째의 에너지 소비량은 증가하고 두번째의 에너지 소비량은 단위길이당 운동방향이 바뀌는 횟수가 감소하므로 감소하게 된다. 이러한 추세로 가면 보폭이 80cm이상인 어느 곳에서는 Specific Resistance곡선이 다시 증가하게 된다고 예측할 수 있다. 또한 보폭이 80cm이상인 곳에 Specific Resistance가 최소가 되는 보폭이 존재 할 것이라고 예측할 수 있다.

(3) 보행속도

그림(6)에는 몸체의 높이를 75cm, 보폭을 60cm로 했을때 보행속도를 변화시 키면서 최대힘과 Specific Resistance를 표시한 것이다. 최대힘은 보행속도가 1m/s근방에서 증가하기 시작하고, Specific Resistance는 전체적으로 증가하며 그 증가하는 비율도 함께 증가함을 볼 수 있다.

보행속도가 커지면 운동에너지는 속도의 제곱에 비례하여 증가하는 양상을 보인다. 그러나 최대힘과는 상당한 비선형성이 있는 것을 알 수 있다. 최대힘이 증가하기 시작하는때는 다리가 몸체를 지지하고 있다가 이동하는 상태에서의 힘이 한주기 동안에 작용하는 힘중 최대가 될 때이다.

7. 결론

4각 보행로봇의 다리에 사용하기 위해 Pantograph기구를 몇가지 조건을 변화시면서 각 상태에서 에너지 소모량을 계산하였다. 또한 Actuator에 작용하는 최대힘과 Specific Resistance를 통해 다리의 성능을 간접적으로 생각해 보고 해석한 결과를 물리적으로 고찰하였다. 이러한 결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 해석한 Pantograph기구는 포유동물의 다리형태로 몸체가 낮을 수록 근중의 다리 형태로는 몸체가 높을 수록 에너지의 소비량이 적다.
- 2) 보행로봇의 에너지 소비형태는 다리의 운동중 에너지 손실과 다리의 운동방향이 바뀔 때의 손실로 크게 구분할 수 있고, 이 두가지는 보폭의 크기에 따라 달라진다.
- 3) 보행로봇의 보행속도가 증가할 수록 Specific Resistance와 최대힘은 증가하며 에너지 소비를 줄이기 위해서는 보행속도를 가능한한 줄여야 한다. 이 기구에 적합한 보행속도는 약 1m/s정도로 생각할 수 있다.

이 연구에서는 1개의 다리에 대하여 작동조건을 변화시켰지만 기구의 크기가 달라질 경우에도 여러가지 결과의 변화가 예상된다. 또한

보행로봇이 평지만을 보행하기위해서 만들어지는 것이 아닌이상, 여러 장애물에 대한 운동성(Mobility)도 고려한 해석이 필요하다.

8. 참고문헌

1. S.M.Song, V.J.Vohnout, K.J.Waldron, and G.L.Kinzel "Computer Aided Design of a Leg for An Energy Efficient Walking Machine", Mech. & Machine Thy. Vol.19, No.1, pp.17-24, 1984
2. S.M.Song, K.J.Waldron, and G.L.Kinzel, "Computer-Aided Geometric Design of Legs for a Walking Vehicle", Mech. & Machine Thy. Vol.20, No.6, pp.587-596, 1985
3. Makoto Kaneko, Susumu Tachi, Kazuo Tanie, and Minoru Abe, "Basic Study on Similarity in Walking Machine from a Point of Energetic Efficiency", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.RA-3, No.1, pp.19-30, 1987
4. Kenneth J. Waldron, "Force and Motion Management in Legged Locomotion", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.RA-2, No.4, pp.214-220, 1986
5. K.J.Waldron, V.J.Vohnout, Arrie Pery, and R.B.McGhee, "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle", Int. J. of Robotics Research, Vol.3, No.2, pp.37-48, Summer 1984
6. E.J.Haug, Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, 1985

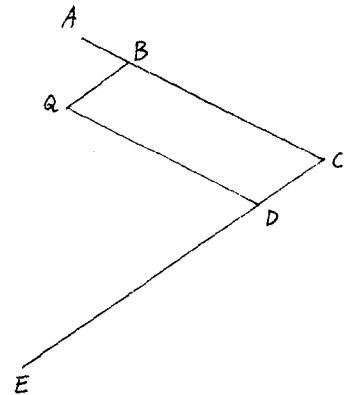


FIG. 1 PANTOGRAPH MECHANISM

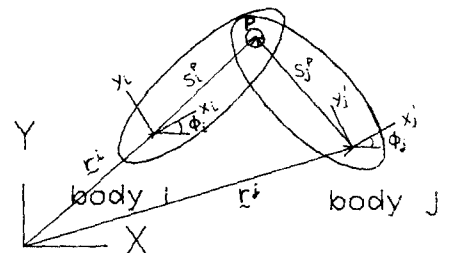


FIG. 2 THE REVOLUTE JOINT

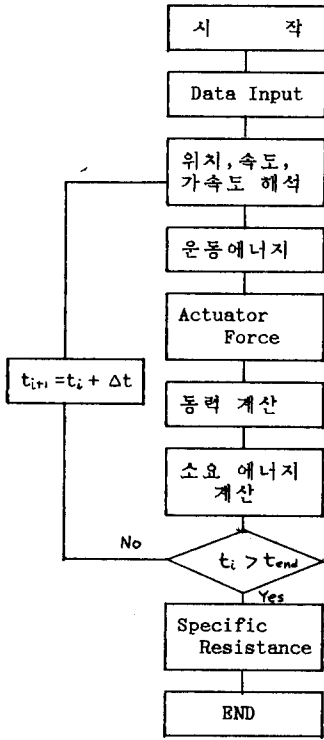


Fig. 3 FLOW CHART

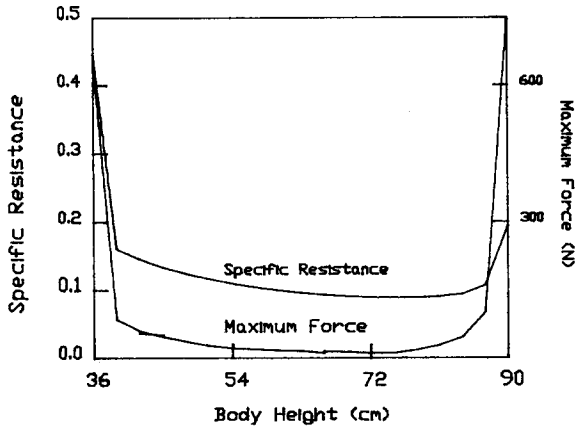


FIG. 4 SPECIFIC RESISTANCE VARYING BODY HEIGHT (SPBED=1M/S, LEG STROKE=60CM)

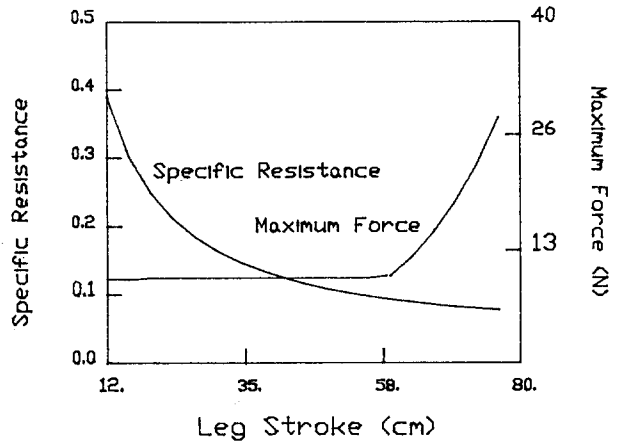


FIG. 5 SPECIFIC RESISTANCE VARYING LEG STROKE (SPBED=1M/S, BODY HEIGHT=75CM)

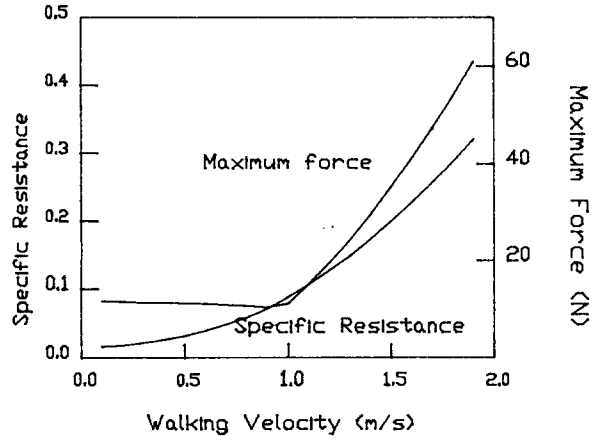


FIG. 6 SPECIFIC RESISTANCE VARYING WALKING SPEED (BODY HEIGHT=75CM, LEG STROKE=60CM)