

다족 보행로봇의 속도작업공간 해석

A Workspace Analysis Method of Multi-Legged Walking Robot in the Velocity Domain

이 지 흥, 전 봉 환

(Jihong Lee and Bong-Hwan Jeon)

Abstract : This paper deals with a workspace analysis of multi-legged walking robots in velocity domain(velocity workspace analysis). Noting that when robots are holding the same object in multiple cooperating robotic arm system the kinematic structure of the system is basically the same with that of a multi-legged walking robot standing on the ground, we invented a way of applying the technique for multiple arm system to multi-legged walking robot. An important definition of reaction velocity is made and the bounds of velocities achievable by the moving body with multi-legs is derived from the given bounds on the capabilities of actuators of each legs through Jacobian matrix for given robot configuration. After some assumption of hard-foot-condition is adopted as a contact model between feet of robot and the ground, visualization process for the velocity workspace is proposed. Also, a series of application examples will be presented including continuous walking gaits as well as several different stationary posture of legged walking robots, which validate the usefulness of the proposed technique.

Keywords : velocity workspace analysis, multi-legged walking robot, reaction velocity, hard-foot-condition

I. 서론

다족 보행로봇은 거친 지면 위를 이동할 경우, 바퀴를 이용한 모빌로봇의 한계를 극복할 수 있는 수단으로서 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히, 동적 걸음새(dynamic gait), 운동 제어(movement control), 걸음새 생성(gait generation), 안정성 해석(stability analysis), 그리고 걸음새 제어성(gait controllability) 등에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다[1]-[4]. 그러나 보행로봇의 조작성(manipulability) 또는 속도작업공간(velocity workspace) 해석에 대한 연구결과는 거의 없다.

속도작업공간이란, 주어진 로봇의 자세에서 로봇팔 관절의 구동장치에서 얻을 수 있는 각관절의 속도한계로부터 얻어지는 로봇팔 끝의 속도범위를 말한다. 로봇팔에 대한 속도작업공간의 기하학적인 형상은 타원이나 다각형의 형태로 표현되어지며, 시스템에 의해 얻을 수 있는 작업속도의 한계에 대한 정보를 포함하고 있다. 단일 로봇팔(single arm)에 대한 조작성의 기하학적 형상에 따른 속도작업공간 해석에 관해서는 많은 연구가 이루어졌고[5][6], 두 대 또는 그 이상의 로봇에 대한 경우로 확장되었다[7]-[9]. 다중협동로봇팔(multiple cooperating robot arm)의 조작성 다각형에 대한 이들 연구결과는 다족 보행로봇의 속도작업공간 해석으로 확장될 수 있으며, 그 결과는 보행로봇의 속도성능에 대한 정보를 제공해 줄뿐만 아니라 속도차원에서의 최적경로계획이나 걸음새계획 등에도 유용하게 응용될 수 있다.

본 논문에서는 기존에 시도된 예가 없는 다족보행로봇의 속도작업공간 해석법을 제안한다. 제안된 방법은 로봇의 몸

체좌표계에 의해 표현되는 각 발끝의 속도를 발끝이 놓이는 지면에 대한 몸체의 속도로 변환함으로써 다중협동로봇팔의 속도작업공간 해석기법을 보행로봇의 이동 속도 작업공간 해석에 적용한다. 조작성 다각형(manipulability polytope)을 이용한 기존의 협동로봇팔 해석법[7]은 각 로봇팔 끝의 접촉조건에 따른 구속조건식과 관절의 속도한계로부터 해석을 위한 부등식을 유도하였으나 제안된 방법은 발끝과 지면의 접촉조건에 가장적합한 hard-foot 조건을 고려함으로써 다리의 자코비안과 다리관절의 속도한계로부터 해석에 필요한 부등식을 직접 유도하였다. 얻어진 부등식 관계는 슬랙변수(slack variable)[10]를 도입함으로써 일반적인 선형 방정식의 형태로 변환된다. 변환된 선형방정식의 변수는 조작성 다각형의 꼭지점과 슬랙변수로 이루지게 되며, 이들중 조작성 다각형의 꼭지점을 골라냄으로써 로봇몸체의 조작성 다각형을 얻을 수 있다.

제안된 해석방법을 4족 보행로봇에서 널리 사용되고 있는 관절 구성을 가진 두 가지 보행로봇에 대해 적용하여 해석을 수행함으로써 그 타당성과 유용성을 보인다. 보행로봇의 속도작업공간 해석기법은 로봇의 각 다리가 여유자유도(redundant degree of freedom)를 갖는 경우와 부족자유도(insufficient degree of freedom)를 갖는 경우에 대해서도 쉽게 확장될 수 있으며 이들에 대한 해석 방법도 본 논문에서 제시한다.

본 논문의 2장에서는 고려되는 로봇의 기구학에 대해 소개하고 논문에서 다루어질 문제를 정의하며, 해석방법을 전개한다. 3장에서는 제안된 기법을 이용하여 4족 보행로봇에 대해 수치해석을 수행한 예에 대해 기술하고, 4장에서는 해석방법을 각 다리가 여유자유도 또는 부족자유도를 갖는 경우에 대해 확장한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 서술한다.

논문접수 : 2001. 9. 22., 채택확정 : 2002. 2. 14.

이지흥 : 충남대학교 메카트로닉스공학과(jihong@cnu.ac.kr)

전봉환 : 한국해양연구원(bhjeon@kriso.re.kr)

*본 논문은 로커(주)에서 지원하여 연구하였습니다.

II. 다족 보행로봇의 속도작업공간

1. 로봇 기구학과 문제 설정

그림 1과 같이 r 개의 다리를 가진 로봇을 가정하고 각 다리의 발끝과 지면사이는 그림 2와 같은 마찰을 고려한 점 접촉(point-contact-with-friction or hard-foot)[7]모델로 가정한다. 지면에 고정된 기준좌표계를 O_r , 몸체에 고정된 몸체좌표계 O_b 라고 각각 정의하고, \dot{q}_i 를 i 번째 다리의 h_i 차원 관절각속도벡터라 하자. 로봇과 발끝의 선속도만을 고려하면, 몸체좌표계에 대한 i 번째 발끝의 속도 ${}^b v_{fi}$ 는 다음식으로 주어진다.

$${}^b v_{fi} = {}^b J_i^v \dot{q}_i, \quad i = 1, \dots, r \quad (1)$$

여기서, ${}^b J_i^v$ 는 몸체좌표계에 대한 i 번째 발의 자코비안 행렬 중 선속도 부분을 나타낸다. (1)을 기준좌표계에서 본 몸체의 속도로 변환하기 위해 변환행렬 ${}^r T_b$ 를 도입하여 발끝에 대한 몸체의 속도로 변환하면,

$${}^r v_{bi} = {}^r T_b {}^b v_{fi}, \quad i = 1, \dots, r \quad (2)$$

로 되고, 이를 다시 발끝좌표계에서 기준좌표계로의 변환행렬 ${}^r T_f$ 를 도입하여 기준좌표계로 변환하면,

$${}^r v_{bi} = {}^r T_f {}^f v_{bi}, \quad i = 1, \dots, r \quad (3)$$

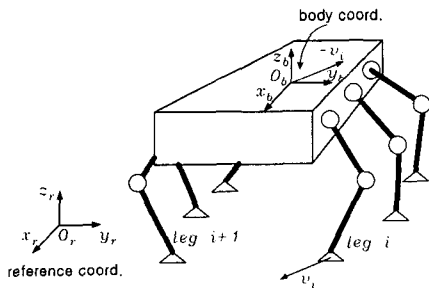


그림 1. 몸체좌표계에 대한 발.
Fig. 1. Foot with respect to body coordinates.

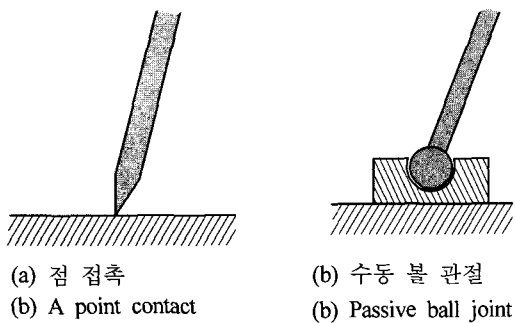


그림 2. hard-foot 모델의 예.
Fig. 2. Examples of hard-foot model.

로 된다. (1), (2), (3)으로부터 선속도에 대한 보행로봇의 기구학 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$${}^r v_{bi} = {}^r T_b {}^b J_i^v \dot{q}_i, \quad i = 1, \dots, r \quad (4)$$

여기서, ${}^r T_b = {}^r T_f {}^f T_b$ 이다. 그런데, ${}^r v_{bi}$ 는 몸체의 속도이므로 모든 ${}^r v_{bi}$ 의 기구학적 구속력은 같게 된다. 즉, ${}^r v_{bi} = {}^r v_{b2} = \dots = {}^r v_{br}$. 따라서, 단순화된 표기로 $v_b \equiv {}^r v_{bi}$ 와 $J_i \equiv {}^r T_b {}^b J_i^v$ 를 도입하면, 보행로봇의 최종 기구학식으로 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$v_b = J_i \dot{q}_i, \quad i = 1, \dots, r \quad (5)$$

만약, 기준좌표계와 몸체좌표계의 방향이 일치한다면 hard-foot 접촉조건 하에서 실제로 $v_b = {}^r v_{bi} = -{}^b v_{fi}, i = 1, \dots, r$ 이 되고, 이를 반작용 속도(reaction velocity)라고 정의한다(그림 3).

마지막으로, 관절공간에서의 속도한계가 다음과 같은 형태로 주어지면,

$$\dot{q}_{i,j}^{\min} \leq \dot{q}_{i,j} \leq \dot{q}_{i,j}^{\max}, \quad i = 1, \dots, r, \quad j = 1, \dots, h_i \quad (6)$$

여기서, $\dot{q}_{i,j}$ 는 i 번째 다리의 j 번째 관절의 속도,

로봇몸체의 속도작업공간을 얻기 위해 다루어져야 할 문제는 다음과 같이 요약된다.

문제 : (6)으로 표현되는 주어진 각 관절 속도 한계에서 (5)로 표현되는 몸체의 선속도 v_b 의 범위를 구한다.

2. 문제의 간략화(관절 속도의 무차원화)

각 관절의 속도한계가 서로 다른 경우라 할지라도, 관절 속도벡터는 같은 형태로 표현되는 변수로 변환될 수 있다 [7]-[9]. 해석을 단순화하기 위해 (6)의 관절 속도 한계에 대해 다음의 변환을 수행한다.

$$x_i \equiv D_i \dot{q}_i + x_i^0 \quad (7)$$

여기서,

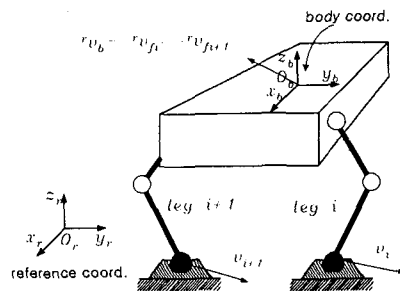


그림 3. i 번째 다리에 의한 반작용 속도.
Fig. 3. Reaction velocity of i -th leg.

$$D_i \equiv \text{diag} \left[\frac{2}{\dot{q}_{i,1}^{\max} - \dot{q}_{i,1}^{\min}} \dots \frac{2}{\dot{q}_{i,h_i}^{\max} - \dot{q}_{i,h_i}^{\min}} \right] \quad (8)$$

$$x_i^0 \equiv \left[-\frac{\dot{q}_{i,1}^{\max} + \dot{q}_{i,1}^{\min}}{\dot{q}_{i,1}^{\max} - \dot{q}_{i,1}^{\min}} \dots -\frac{\dot{q}_{i,h_i}^{\max} + \dot{q}_{i,h_i}^{\min}}{\dot{q}_{i,h_i}^{\max} - \dot{q}_{i,h_i}^{\min}} \right] \quad (9)$$

이고, $\text{diag}(\cdot)$ 는 주어진 대각 요소를 갖는 대각행렬이다. 그러면, (5)와 (6)의 단순화된 형태로 (10)과 (11)을 얻는다.

$$v_N = Jx_i, \quad x_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,h_i})^T \quad (10)$$

$$-1 \leq x_{i,j} \leq 1, \quad i=1, \dots, r, \quad j=1, \dots, h_i \quad (11)$$

(8)의 D_i 는 항상 역행렬이 존재하므로, (5)의 모든 변수들은 (11)과 (10)의 변수들이 계산되어질 때마다 (7)을 통해서 얻어진다. 따라서, 지금부터는 (5)와 (6)을 다루는 대신 단순화된 형태의 (10)과 (11)을 다룰 수 있다.

3. 적합자유도(proper degree of freedom)의 경우

각 다리의 자유도는 로봇에 의해 수행되어야 할 작업에 의존한다. 일반적으로 로봇의 다리는 작업공간에서 임의의 위치를 얻기 위해 3자유도를 갖는 경우가 많다. 이러한 경우, (10)의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$x_i = J_i^{-1} v_N, \quad i=1, \dots, r \quad (12)$$

여기서, J_i^{-1} 은 J_i 의 역행렬이며, J_i 의 역행렬이 존재하지 않는 경우에 대하여는 IV장에서 다루어진다. 이제, 모든 다리에 대해 (12)을 묶어서 표현하면 다음식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{-1} \\ \vdots \\ J_r^{-1} \end{bmatrix} v_N \quad (13)$$

뒤에 설명될 다른 경우에 대해서도 유효하도록 하기 위해 새로운 변수를 다음과 같이 도입하고,

$$y = v_N \quad (14)$$

(10)의 구속조건을 모든 다리의 모든 관절에 적용하면 다음과 같은 부등식을 얻을 수 있다.

$$-\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \leq C_p y \leq \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서,

$$C_p \equiv \begin{bmatrix} J_1^{-1} \\ \vdots \\ J_r^{-1} \end{bmatrix} \in R^{h \times s} \quad (16)$$

이고, (16)의 $h = \sum_i h_i$ 이며 s 는 각 J_i 의 랭크(rank)로부터 정해진다. 여기서, 음이 아닌 슬랙변수 $\sigma \in R^{2h}$ [10]을 도입하여 부등식을 항등식으로 변환하면 다음식을 얻는다.

$$Bz = d \quad (17)$$

이때,

$$B \equiv \begin{bmatrix} C_p \\ -C_p \end{bmatrix} \in R^{2h \times (s+2h)} \quad (18)$$

$$z \equiv \begin{bmatrix} y \\ \sigma \end{bmatrix} \in R^{(s+2h)}, \quad d \equiv \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \in R^{2h} \quad (19)$$

이다. 이제 B 의 1열부터 s 열(즉, $\begin{bmatrix} -C \\ C \end{bmatrix}$)과 $I_{2h \times 2h}$ 의 $2h$ 열에서 선택한 임의의 $(2h-s)$ 열을 가지는 $2h \times 2h$ 정방행렬 B_k 를 고려한다. 그러면 (17)의 축소된 차원의 방정식을 다음과 같이 얻는다.

$$B_k \tilde{z} = d, \quad k=1, \dots, \binom{2h}{s} \quad (20)$$

여기서,

$$\tilde{z}^T \equiv [y \ \sigma], \quad 0 \leq \sigma^T \in R^{2h-s} \quad (21)$$

이다. 모든 $\binom{2h}{s}$ ($2h$ 로부터의 s 조합)에 대해서 각기 다른 B_k 들이 존재하게 되고, 비특이 행렬 B_k 에 대해서 (20)의 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$\tilde{z}_k^* = \begin{bmatrix} y_k^* \\ \tilde{\sigma}_k^* \end{bmatrix} \equiv (B_k)^{-1} d \quad (22)$$

이들 \tilde{z}_k^* ([1]의 basic solution에 대응)중, 슬랙변수 내에 음이 아닌 요소를 가지는 것들은 조각성 다각형의 꼭지점의 좌표를 포함하고 있으며 이는 [7]의 feasible basic solution에 대응된다. 해 \tilde{z}_k^* 의 v 성분(작업속도)은 조각도 다각형의 꼭지점들을 형성하게 된다. 이때, 모든 해가 다각형을 형성하는데 기여하지는 않으며, P_v 로부터 불필요한 요소($\text{conv}(P_v)$)의 경계가 아닌 내부점을 제외시키는 기법은 [8]에 나타나 있다.

III. 적용 예

다음의 예에 나오는 로봇의 모든 다리에 있어서 단위 관절 속도 한계 $|x_{i,j}| \leq 1$ 를 얻을 수 있도록 (7)과 같은 적합한 변환이 적용되었다고 가정한다.

1. 적용 예 1 (거미형 로봇)

그림 4에 주어진 거미형 4족 보행로봇[10]에서 모든 링크

(link)를 단위길이로 선정하고 로봇 몸체좌표계의 원점의 속도를 고려한다. 로봇의 속도는 \dot{x}, \dot{y} 및 \dot{z} 로 표현되고 i 번째 다리의 j 번째 관절변수는 그림 4에서처럼 $q_{i,j}$ ($i=1,2,3,4, j=1,2,3$)로 표현된다. 이때 그림 5에 주어진 로봇의 자세 ($[q_{1,1}, q_{1,2}, q_{1,3}] = [q_{3,1}, q_{3,2}, q_{3,3}] = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}]$ [rad], $[q_{2,1}, q_{2,2}, q_{2,3}] = [q_{4,1}, q_{4,2}, q_{4,3}] = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}]$ [rad])에 대해 II-3절에서 언급된 기법을 적용하면 (16)에 대해 다음과 같은 식을 얻을 수 있고,

$$C_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.7071 & -0.7071 \\ 0 & 0 & 1.4142 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.7071 & -0.7071 \\ 0 & 0 & 1.4142 \end{bmatrix} \quad (23)$$

II-3의 이후 방법에 따라 다음과 같은 조작성 다각형의 꼭지점을 얻을 수 있으며 이를 그림으로 나타내면 그림 6과 같이 나타난다.

$$P_v = \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ -1.414 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -0.7071 \\ -0.7071 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -0.7071 \\ 0.7071 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.7071 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0.7071 \\ -0.7071 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0.7071 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.414 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (24)$$

결과로부터 몸체의 최대 속도는 y 축의 방향으로 ± 1.414 로 얻어지고, 몸체 좌표계의 x 축 성분 속도는 0으로 나타난다. 그림 5에 주어진 관절각도의 기구학적 다리형상을 고려하면, i 번째 다리의 발끝은 $q_{i,1}$ 관절의 회전축 상에 있으므로 발끝과 관절의 회전축 사이의 거리 l_i 는 0이 되고, $\dot{q}_{i,j} \times l_i$ 에 의해 발생하는 x 축 방향의 속도는 모두 0이 된다는 것은 직

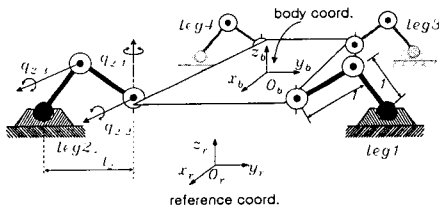


그림 4. 거미형 보행로봇.
Fig. 4. Spider type walking robot.

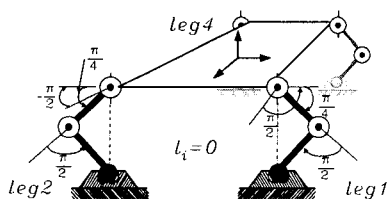


그림 5. 거미형 로봇 자세 1.
Fig. 5. Spider type walking posture 1.

관적으로 알 수 있으며 시뮬레이션 결과와 일치한다.

같은 방법을 그림 7에 주어진 거미형 로봇의 또다른 자세 ($[q_{1,1}, q_{1,2}, q_{1,3}] = [q_{3,1}, q_{3,2}, q_{3,3}] = [\frac{\pi}{2}, -\frac{7\pi}{36}, \frac{14\pi}{36}]$ [rad], $[q_{2,1}, q_{2,2}, q_{2,3}] = [q_{4,1}, q_{4,2}, q_{4,3}] = [-\frac{\pi}{2}, -\frac{7\pi}{36}, \frac{14\pi}{36}]$ [rad])에 대해 적용하면 다음과 같은 다각형의 꼭지점을 얻고, 그림 8과 같은 조작성 다각형을 얻을 수 있다.

$$P_v = \left\{ \begin{bmatrix} -1.5395 \\ -0.6104 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1.5395 \\ 0 \\ -1.6770 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1.5395 \\ 0 \\ 1.6770 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1.5395 \\ 0.6104 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.5395 \\ -0.6104 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.5395 \\ 0 \\ -1.6770 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.5395 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.5395 \\ 0.6104 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (25)$$

시뮬레이션 결과로부터 최고속도는 $\begin{bmatrix} -1.5395 \\ 0 \\ -1.6770 \end{bmatrix}$ 또는

$\begin{bmatrix} 1.5395 \\ 0 \\ 1.6770 \end{bmatrix}$ 로 얻어짐을 알 수 있다. 자세 1에 대한 결과와 비교해 보면, 이 경우 l_i 가 0이 아니므로 로봇 몸체의 속도는 모든 방향으로 얻어질 수 있음을 알 수 있다. 또한 몸체의 속도는 관절과 발끝까지의 거리에 비례하므로, 그림 7에 주어진 자세에서 y 방향에 비해 x 방향과 z 방향으로의 속도가 크게 나타날 것임을 추측할 수 있고, 그림 8의 시뮬레이션 결과에서도 나타나고 있다.

2. 적용예 2 (강아지형 로봇)

최근 세계적으로 큰 관심을 모으고 있는 SONY의 강아지 로봇 AIBO[2]나 KIST(Korea Institute of Science and Technology)에서 개발된 CENTOUR[3] 등은 그림 9와 같은 다리

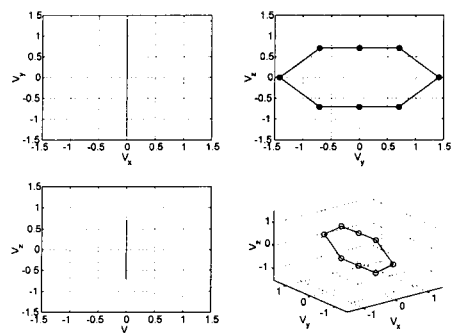


그림 6. 자세 1에 대한 조작성 다각형.
Fig. 6. Manipulability polytope of posture 1.

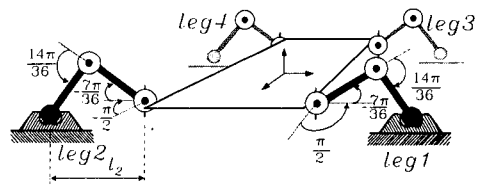


그림 7. 거미형 로봇 자세 2.
Fig. 7. Spider type robot posture 2.

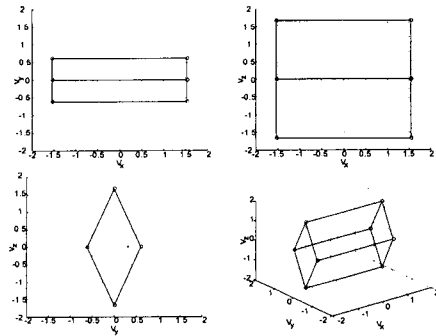


그림 8. 거미형 로봇 자세 2에 대한 조작성 다각형.
Fig. 8. Manipulability polytope of posture 2.

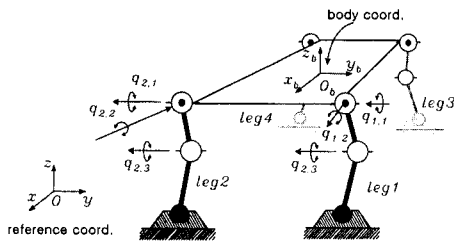


그림 9. 강아지형 로봇.
Fig. 9. Puppy type robot.

의 관절구성을 가지지만 이전의 예와 같은 방법으로 해석이 가능하다. 그림 10과 같이 모든 다리의 모든 관절의 각도가 0인 자세에 대해 이전과 같은 방법으로 해석을 수행한 결과 그림 11과 같은 조작성 다각형을 얻을 수 있었다. 이는 로봇몸체의 속도는 관절의 회전축과 발끝까지의 위치벡터에 수직인 방향 (cross product)으로만 속도가 나타나므로, 그림 10의 자세가 z 방향으로 움직일 수 없는 자세라는 사실과 잘 일치하고 있다.

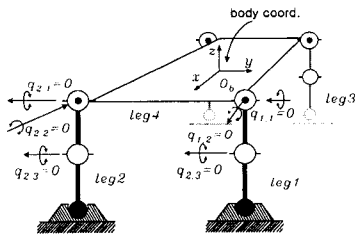


그림 10. 강아지형 로봇 자세 1.
Fig. 10. Puppy type robot posture 1.

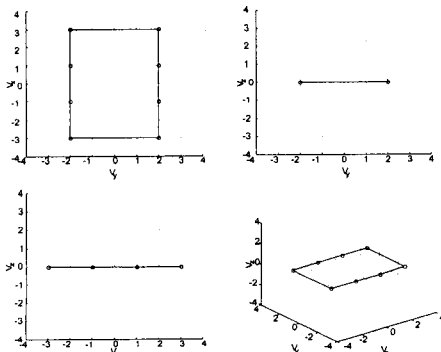


그림 11. 자세 1에 대한 조작성 다각형.
Fig. 11. Manipulability polytope of posture 1.

그림 12는 $[q_{1,1}, q_{1,2}, q_{1,3}] = [q_{2,1}, q_{2,2}, q_{2,3}] = [-\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}]$

[rad], $[q_{3,1}, q_{3,2}, q_{3,3}] = [q_{4,1}, q_{4,2}, q_{4,3}] = [\frac{\pi}{4}, 0, -\frac{\pi}{4}]$ [rad]의 자세를 가지는 강아지형 로봇의 또 다른 자세이며 이 경우 그림 13과 같은 조작성 다각형을 얻을 수 있었다. 이러한 결과로부터 주어진 자세에서 로봇관절의 한계로부터 얻을 수 있는 최대의 속도와 방향을 쉽게 알 수 있으며 이는 로봇의 속도차원에서 최적 걸음새 생성이나 로봇의 설계문제에 활용될 수 있다.

3. 적용 예 3(연속 보행)

제안된 알고리즘은 연속보행을 위한 각 자세에 대하여도 적용함으로써 보행의 과정에 있는 각 자세에서 얻을 수 있는 속도정보를 구해 낼 수 있다. 적용예 1의 거미형 로봇이 그림 14와 같은 걸음새를 반복하며 진행해 나간다고 가정하면, 검정색으로 표시된 발만이 지면에 닿아 몸체의 운동에 기여하게 된다. 각 자세에 대해 제안된 알고리즘을 이용하여 그림 15와 같은 조작성 다각형을 얻을 수 있다. 결과로부터 각 스텝에서 각 관절의 속도 한계를 이용하여 몸체에 나타날 수 있는 속도정보를 얻을 수 있으며 이는 각각의 자세에서 얻을 수 있는 속도의 범위를 제공하므로 최적걸음새 생성, 경로 계획 등에 유용하게 이용될 수 있다.

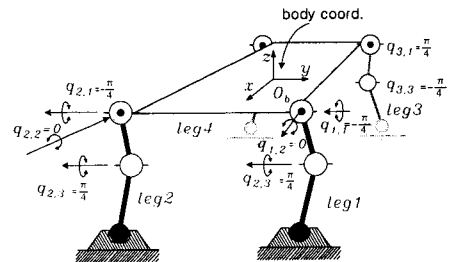


그림 12. 강아지형 로봇 자세 2.
Fig. 12. Puppy type robot posture 2.

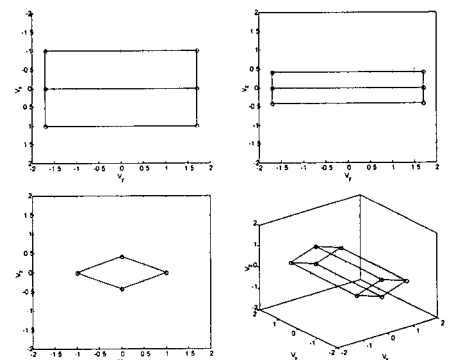


그림 13. 자세 2에 대한 조작성 다각형.
Fig. 13. Manipulability polytope of posture 2.

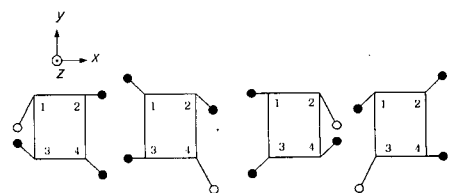


그림 14. 연속보행을 위한 로봇의 자세.
Fig. 14. Config. for continuous walking.

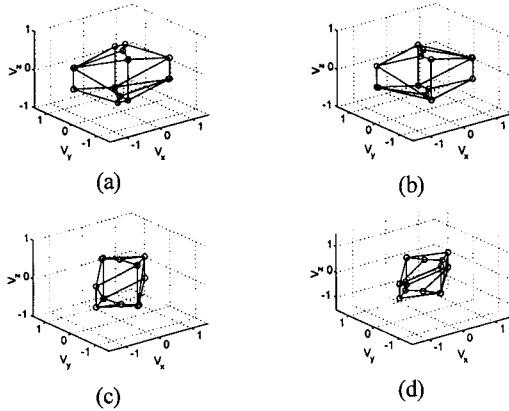


그림 15. 연속보행 과정에 대한 조작성 다각형.
Fig. 15. Manipulability polytope for Ex.3.

IV. 다른 경우로의 확장

1. 부족자유도의 경우

작업공간에서 로봇의 각 다리가 임의의 위치와 자세를 얻기에 불충분한 자유도를 가지고 있는 경우가 있을 수 있다. 이런 경우 역시 적합자유도를 갖는 다중 로봇 시스템의 개념을 활용한다면 해석될 수 있다. 즉, 독립적인 운동 요소와 종속적인 운동요소를 분리하여 $v = \begin{bmatrix} v^{ind} \\ v^{dep} \end{bmatrix}$ 로 재정리하고, 자코비안 행렬도 독립운동 부분과 종속운동 부분으로 분리하여 $J = \begin{bmatrix} J^{ind} \\ J^{dep} \end{bmatrix}$ 로 재정리한다. 그러면 (26)을 얻는다.

$$v = \begin{bmatrix} v^{ind} \\ v^{dep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J^{ind} \\ J^{dep} \end{bmatrix} x \tag{26}$$

v^{dep} 는 v^{ind} 가 정해지면 얻어진다. 원래의 기구학식을 재정리하면 다중 협동 로봇 시스템에 대해서 다음과 같이 분리된 식을 얻을 수 있고,

$$v^{ind} = J_i^{ind} x_i, \quad i = 1, \dots, r \tag{27}$$

종속 운동 요소로부터 다음의 구속식을 얻을 수 있다.

$$J_1^{dep} x_1 = \dots = J_r^{dep} x_r \tag{28}$$

그러면 (27)은 적합자유도 경우의 기구학식 (12)와 같아진다. 각각의 J_i^{ind} 는 정방행렬이므로, 각 다리에 대한 (27)을 모두 모으면 (29)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (J_1^{ind})^{-1} \\ \vdots \\ (J_r^{ind})^{-1} \end{bmatrix} \tag{29}$$

다음식을 정의하고,

$$C_J \equiv \begin{bmatrix} (J_1^{ind})^{-1} \\ \vdots \\ (J_r^{ind})^{-1} \end{bmatrix} \tag{30}$$

(15)을 (29)로 대체하여 이 경우의 속도작업공간 해석에 대해 적합자유도의 경우와 같은 수학적 과정을 적용시키고, 결과로 얻어진 각 꼭지점이 (28)의 구속조건을 만족하는지 조사한다. (27)의 종속변수에 대한 구속조건을 만족하는 꼭지점만이 이 경우의 작업 속도의 영역(P_v)을 정하는 꼭지점이 될 수 있다. 구속조건식 (28)을 만족하는 꼭지점이 존재하지 않는다면 이 경우의 로봇 다리의 형상으로는 몸체를 어떤 방향으로도 움직일 수 없음을 의미한다.

2. 여유자유도를 갖는 경우

로봇의 다리가 작업공간에서 임의의 자세를 얻기 위해 필요한 자유도 보다 더 많은 자유도를 가질 경우 이를 여유자유도의 경우라 한다. 이 경우 (1)의 해는 다음 식으로 주어진다. 이는 잘 알려져 있다.

$$x_i = J_i^\# v + N(J_i) \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, r \tag{31}$$

여기서 $J_i^\#$ 은 J_i 의 유사역행렬(pseudoinverse matrix)이고, $N(J_i)$ 는 J_i 의 널공간을 이루는 행렬이며, ϵ_i 는 J_i 의 랭크에 의해 차원이 정해지는 임의의 벡터이다. 모든 다리에 대해 (31)을 모으면 다음 행렬 형태를 얻는다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^\# & N(J_1) & 0 & \dots & 0 \\ & \vdots & & & \\ J_r^\# & 0 & \dots & 0 & N(J_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_r \end{bmatrix} \tag{32}$$

다음과 같은 새로운 변수를 도입하고,

$$y \equiv \begin{bmatrix} v \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_r \end{bmatrix} \tag{33}$$

(9)의 구속조건을 모든 다리의 관절에 대해 적용하면 다음과 같은 부등식을 얻을 수 있다.

$$-\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \leq C_{Ry} y \leq \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \tag{34}$$

여기서,

$$C_{Ry} \equiv \begin{bmatrix} J_1^\# & N(J_1) & 0 & \dots & 0 \\ & \vdots & & & \\ J_r^\# & 0 & \dots & 0 & N(J_r) \end{bmatrix} \in R^{h \times s} \tag{35}$$

그리고, (16)을 위식으로 대체함으로써 적합자유도의 경우와 같은 수학적 과정으로 허용 속도작업 공간을 얻을 수 있다. 나머지 부분은 적합자유도의 경우와 같으므로 세부적인 설명은 생략한다.

V. 결론

각 다리관절의 구동장치에 주어질 구동능력의 한계를 이

용하여 보행로봇 시스템이 도달할 수 있는 속도의 범위를 구해내는 보행로봇의 속도 조작성 해석에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 통하여 다중 로봇이 공동으로 물체를 이동시키는 경우의 속도작업공간 해석방법으로부터 보행로봇 몸체의 조작성에 관한 기하학적인 형상을 얻어내는 기법을 유도해 낼 수 있었고, 이때, 속도작업공간에서 다각형으로 표현되는 조작성은 시스템에 의해 얻어지는 몸체 속도의 영역에 대한 정보를 포함하게 된다.

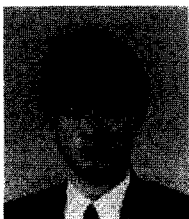
문제의 단순화를 위해, 로봇 발끝의 접촉조건을 힘만이 지면으로 전달되는 hard-foot 모델로 제한하고, 선속도 성분만을 고려하여 이론을 전개하였다. 제안된 방법은 직관적으로 해의 형태를 추측할 수 있는 아주 간단한 경우뿐만 아니라 몇 가지 실제적인 예에 적용함으로써 여러 가지 보행로봇의 경우에 적용 가능함을 보였고, 다리의 자유도가 다른 두 경우에 대해서도 쉽게 확장될 수 있었다. 제안된 방법은 속도 차원에서의 최적 경로계획이나 걸음새계획 및 보행로봇의 이동성 평가 등에 유용하게 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

향후의 연구는 다양한 발끝의 접촉조건과 보행로봇의 동역학 조작성을 고려한 연구로 확장될 예정이며 조작성 다각형의 체적이나 교점등의 정보로부터 global 조작성이나 specialize 조작성 등에 관한 정보를 얻는 연구와 보행로봇의 최적경로계획이나 걸음새계획 및 이동성 평가 등에 관한 연구로 확장될 수 있다.

참고문헌

[1] Bill Goodwine and Joel Burdick, "Gait controllability for legged robots," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 484-489, 1998.
 [2] Vincent Hugel and Pierre Blazevic, "Towards efficient implementation of quadruped gaits with duty factor of

0.75," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 2360-2365, 1999.
 [3] Dong-Oh Kang and Yun-jung Lee et al., "A study on an adaptive gait for a quadruped walking robot under external forces," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 2777-2782, 1997.
 [4] W. Ilg, J. Albiez, H. Jedele, K. Berns, and R. Dillmann, "Adaptive periodic movement control for the four legged walking machine BISAM," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 2354-2359, 1999.
 [5] B. Bayle, J.Y. Fourquet, and M. Renaud, "Manipulability analysis for mobile manipulators," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1251-1256, 2001.
 [6] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," *J Robot*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.
 [7] Antonio Bicchi, Claudio Melchiorri, and Daniele Balluchi, "On the mobility and manipulability of general multiple limb robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 2, pp. 215-228, 1995.
 [8] J. Lee, "Velocity workspace analysis for multiple arm robot systems," *Robotica*, vol. 19, pp. 581-591, 2001.
 [9] J. Lee, "A structured algorithm for the minimum ∞ -norm solutions and its application to robot velocity workspace analysis," *Robotica*, vol. 19, pp. 343-352, 2001.
 [10] Jasbir S. Arora, "Introduction to optimum design," McGraw-Hill, 1989.
 [11] Shigeo Hirose and Keisuke Kato, "Study on quadruped walking robot in Tokyo Institute of Technology-Past, Present and Future-," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 414-419, 2000.
 [12] J. Lee, "A study on the manipulability measures for robot manipulators," *Proc. IEEE/RSJ Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1458-1464, Sept. 1997.



이 지 홍

1960년 4월 12일생, 1983년 서울대 전자공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사. 2001년~현재 충남대학교 메카트 로닉스공학과 교수. 관심분야는 로보틱스, 인공지능.



전 봉 환

1970년 1월 14일생, 1996년 부경대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1996), 1996년~현재 한국해양연구원 해양개발시스템연구본부 선임연구원, 2001년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사과정. 관심분야는 로보틱스 및 응용.