

비홀로노믹 모바일 매니퓰레이터의 영공간 투영에 기반한 충돌 회피

Collision Avoidance Based on Null Space Projection for a Nonholonomic Mobile Manipulator

김계진¹·윤인환²·송재복[†]

KyeJin Kim¹, InHwan Yoon², Jae-Bok Song[†]

Abstract: Since the mobile platform and the manipulator mounted on it move at the same time in a mobile manipulator, the risk of mutual collision increases. Most of the studies on collision avoidance of mobile manipulators cannot be applied to differential drive type mobile platforms or the end-effector tends to deviate from the desired trajectory for collision avoidance. In this study, a collision avoidance algorithm based on null space projection (CANS) that solves these two problems is proposed. To this end, a modified repulsive force that overcomes the non-holonomic constraints of a mobile platform is generated by adding a virtual repulsive force in the direction of its instantaneous velocity. And by converting this repulsive force into a repulsive velocity and applying it to the null space, the end-effector of the robot avoids a collision while moving along its original trajectory. The proposed CANS algorithm showed excellent performance through self-collision avoidance tests and door opening tests.

Keywords: Mobile Manipulator, Collision Avoidance, Redundancy Resolution

1. 서 론

모바일 매니퓰레이터는 모바일 플랫폼을 통해 넓은 공간을 이동할 수 있고, 모바일 플랫폼에 장착된 매니퓰레이터를 이용하여 다양한 작업을 수행할 수 있어 최근 수요가 증가하고 있다. 특히 문 열기 작업처럼 단일 로봇만으로 수행이 어려운 작업도 두 로봇의 통합 제어를 통해 성공적으로 수행할 수 있다. 통합 제어란 두 로봇이 협조하여 작업 공간 상의 궤적을 생성하는 것을 의미한다. 한편, 통합 제어를 기반으로 모바일 매니퓰레이터를 구동하면, 작업 공간 상에서 로봇의 자세를 결정하는 자유도 외에 여자유도가 발생한다. 통합 제어 시에 여

자유도를 적절히 제어하면 작업 공간 상의 자세를 결정하는 것뿐만 아니라, 관절 한계 회피, 특이점 회피, 충돌 회피와 같은 작업을 부수적으로 수행할 수 있다. 일반적으로 여자유도 제어는 영공간 투영^[1]을 통해 수행한다.

한편, 통합 제어 기반의 모바일 매니퓰레이터를 이용한 작업에서 모바일 플랫폼과 매니퓰레이터 사이의 충돌이 발생하거나 물체와의 충돌이 발생하면 로봇 또는 작업환경이 파손될 수 있다. 그러므로 모바일 매니퓰레이터의 충돌 회피를 위해서 많은 연구들이 진행되고 있다. [2-5]에서는 거리 정보에 기반한 반발력을 생성하고, 영공간에 반발력을 반영하여 충돌을 회피하는 방법을 제시하였다. 그러나 모바일 플랫폼의 비홀로노믹 제약 조건을 고려하지 않아, 산업현장에 많이 사용되는 차동 구동형 모바일 플랫폼에 적용할 수 없다는 단점이 있다. [6]에서 제안된 방법은 가중 자코비안(weighted Jacobian)을 이용하여 충돌이 발생하는 링크의 움직임을 제한시키는 방법으로 충돌을 회피하였다. 그러나 이런 방식을 사용하면 장애물과 가까워지는 방향의 관절 움직임들을 제한하여, 충돌 회피에 사용된 가중치가 제어 시스템에 반영되지 않아 사용자가

Received : Nov. 24. 2021; Revised : Jan. 26. 2022; Accepted : Jan. 28. 2022

※ This research was supported by the MOTIE under the Industrial Foundation Technology Development Program supervised by the KEIT (No. 20008613)

1. MS Student, Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (kjp1685@korea.ac.kr)

2. PhD Student, Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (inhwan94@korea.ac.kr)

† Associate Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (jbsong@korea.ac.kr)

의도한 작업 공간 상의 궤적을 이탈할 수 있다. [7]에서는 비홀로노믹 제약 조건을 고려하여 모바일 매니퓰레이터의 충돌 회피를 구현하였다. 그러나 영공간 투영 방법이 아닌 우선 순위 작업 방법을 이용하여 구현하여, 작업의 우선 순위에 따라 목표했던 말단 작업의 궤적을 이탈할 가능성이 있다.

본 연구에서는 GJK (Gilbert-Johnson-Keerthi distance) 알고리즘^[8]을 이용하여 충돌 대상과 모바일 플랫폼 사이 거리를 계산하고, 거리 기반의 반발력을 영공간에 적용한다. 따라서 로봇 말단 궤적을 유지하면서 모바일 매니퓰레이터의 자가 충돌 회피 및 말단 작업 대상과의 충돌을 회피할 수 있다. 또한 모바일 플랫폼의 비홀로노믹 제약 조건을 고려하여 차동 구동형 모바일 플랫폼에도 적용이 가능하다.

2장에서는 영공간 투영을 통한 여자유도 제어를 설명하고, 3장에서는 충돌 회피를 위한 반발력 생성 방법에 대해서 설명한다. 4장에서는 자가 충돌 회피와 문 열기 실험을 통해 제안된 알고리즘을 검증한 실험 결과를 설명하고, 5장에서는 결론을 도출한다.

2. 영공간 투영을 통한 여자유도 제어

영공간(null space)은 여자유도 로봇을 제어할 때 로봇의 말단 속도에 영향을 주지 않는 관절 각속도 벡터의 집합이다. 따라서 영공간을 통해 모바일 매니퓰레이터를 제어하면, 말단 궤적에는 영향을 주지 않으면서 여자유도를 이용하여 충돌 회피 작업을 수행할 수 있다. 따라서 본 절에서는 영공간 투영을 통한 여자유도 제어 방법에 대해서 설명한다. 영공간 투영의 기본 식은 다음과 같다^[1].

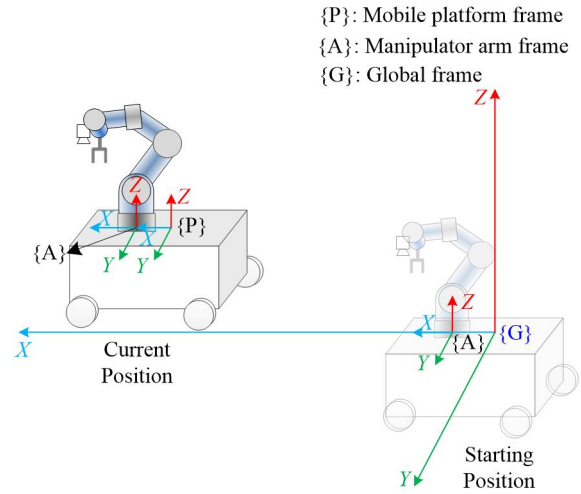
$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}_{\text{task}} + \dot{\mathbf{q}}_{\text{n null}} \quad (1)$$

where

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{task}} = \mathbf{J}_{GE}^+ \dot{\mathbf{x}}_{GE} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{n null}} = (\mathbf{I} - \mathbf{J}_{GE}^+ \mathbf{J}_{GE}) \mathbf{b} \quad (3)$$

여기서 $\dot{\mathbf{q}}$ 은 모바일 매니퓰레이터의 관절 속도로 8×1 벡터인데, $\dot{q}_1 \sim \dot{q}_6$ 은 매니퓰레이터의 관절 속도, $\dot{q}_7 \sim \dot{q}_8$ 은 각각 모바일 플랫폼의 선속도와 각속도이다. 또한 $\dot{\mathbf{q}}_{\text{task}}$ 는 작업공간 속도, $\dot{\mathbf{q}}_{\text{n null}}$ 은 영공간 속도, $\dot{\mathbf{x}}_{GE}$ 는 [Fig. 1]의 전역 좌표계 {G} 기준의 로봇 말단 속도, \mathbf{J}_{GE} 는 로봇 말단 속도와 모바일 매니퓰레이터 관절 속도의 관계를 나타내는 자코비안, \mathbf{J}_{GE}^+ 는 \mathbf{J}_{GE} 의 의사(pseudo) 역행렬이다. 또한, \mathbf{b} 는 여자유도 제어를 위한 임의의 속도 벡터이다. 작업공간 속도는 말단 속도를 결정하는 속도 항이며, 영공간 속도는 부차적인 작업을 수행하는 속도 항이다. 식 (3)의



[Fig. 1] Coordinate frames for a mobile manipulator

\mathbf{b} 에 충돌 대상 간의 반발력을 각 축에 대한 반발 속도로 변환하여 적용하면 말단 궤적을 유지하면서 충돌을 회피할 수 있다. 이때 로봇 말단은 반발력의 방향으로 속도 성분을 가지게 되지만, 모바일 플랫폼이 함께 움직이면서 말단 궤적을 이탈하지 않도록 궤적을 보정해 준다.

3. 충돌 회피를 위한 반발력

충돌을 회피하려면 대상 물체 사이의 반발력을 영공간에 적용해야 한다. 본 절에서는 기존 방식의 반발력과 비홀로노믹 제약 조건을 고려한 반발력을 비교하여 설명한다. 비홀로노믹 제약 조건은 모바일 플랫폼의 자세를 결정하는 자유도(평면의 경우 3자유도)보다 모바일 플랫폼의 자유도(차동 구동의 경우 2자유도)가 낮아 모바일 플랫폼 바퀴의 수직 방향으로 속도 성분을 가질 수 없는 제약 조건을 말한다.

3.1 기존 방식의 반발력

물체 간의 반발력을 생성하기 위해서는 대상 물체 간에 최소 거리를 갖는 두 점의 좌표가 필요하다. 예를 들어, 문 열기 작업을 할 때 두 점을 \mathbf{P}_1 과 \mathbf{P}_2 라고 하면, \mathbf{P}_1 과 \mathbf{P}_2 는 각각 모바일 플랫폼과 문에서 서로와 가장 가까운 두 점이다. 기존 방식의 반발력을 생성하기 위해 두 점의 좌표를 구하는 방법은 연구마다 상이하지만, GJK 알고리즘을 사용하면 연산량이 적어 다른 방법에 비해 실시간 제어가 용이하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 두 점의 좌표를 구하기 위해서 GJK 알고리즘^[8]을 활용한다. 이 알고리즘은 3D 모델 정보를 기반으로 두 물체의 좌표 정보를 받아오고, 민코츠키 차를 이용하여 두 물체 간의 가장 가까운 점의 좌표를 구한다.

먼저 두 점의 최소 제곱 높을 통해 물체와 모바일 플랫폼 간의 거리를 구할 수 있다. 기존 방식의 충돌 회피 방법^[2]에서는 두 점 간의 거리를 기반으로 반발력의 크기를 다음과 같이 정의한다.

$$f_r(d) = \begin{cases} k_r(d_{th} - d) & \text{if } d < d_{th} \\ 0 & \text{if } d \geq d_{th} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 d 는 충돌 대상 간의 최소거리, d_{th} 는 충돌 위험이 있다고 판단하는 임계 거리, f_r 는 충돌 대상 간의 반발력의 크기이다. 또한 k_r 는 반발력 크기를 결정하는 이득인데 실험적으로 적절한 값을 설정하고, 본 연구의 실험에서는 값을 1으로 정하였다.

기존 방식의 충돌 회피 방법에서는 가장 가까운 두 점의 벡터 차를 통해 반발력의 방향을 구할 수 있다. 여기서 매니퓰레이터 링크 말단에 반발력이 적용되므로 기준 좌표계로 [Fig. 1]의 매니퓰레이터 좌표계 $\{A\}$ 로 사용한다. 또한, 모바일 플랫폼이 z 축으로는 움직일 수 없으므로, x 축과 y 축에 대한 충돌 회피만을 고려한다. 그러므로 반발력 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{F}_r(d) = f_r(d) \frac{\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{\|\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2\|} = \{f_{rx}, f_{ry}\} \quad (5)$$

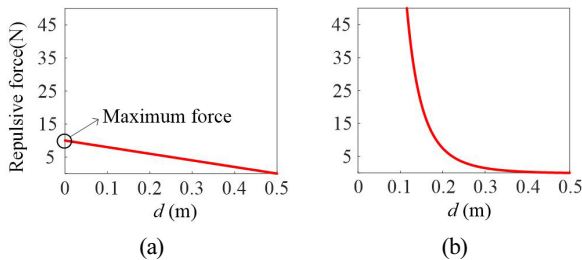
여기서 \mathbf{F}_r 은 충돌 대상 간의 반발력 벡터, f_{rx} 와 f_{ry} 는 각각 $\{A\}$ 에 기준된 x 축 및 y 축 방향의 반발력이다.

3.2 비홀로노믹 제약 조건을 고려한 반발력

앞서 기존 방식의 충돌 회피를 위한 반발력에 대해서 설명하였다. 그러나 기존 방식의 반발력을 사용하면 두 가지 문제점이 발생한다.

먼저, [Fig. 2(a)]와 같이 최댓값이 정해져 있어 충돌을 회피하기에 반발력이 부족한 경우에 충돌 회피에 실패할 수 있다. 이를 방지하기 위해 반발력의 크기를 다음과 같이 정의한다^[9].

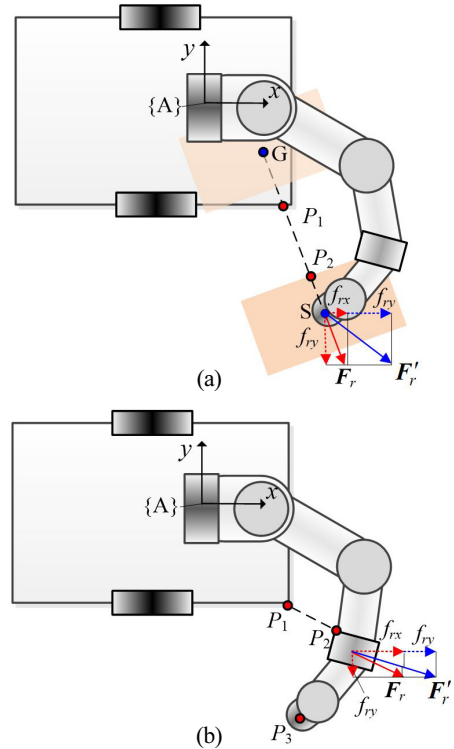
$$f_r(d) = \begin{cases} k_r \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_{th}} \right) \frac{1}{d^2} & \text{if } d < d_{th} \\ 0 & \text{if } d \geq d_{th} \end{cases} \quad (6)$$



[Fig. 2] Repulsive force by (a) the conventional method^[2] and (b) the modified method^[9]

위 식을 반발력으로 사용하면 [Fig. 2(b)]와 같이 거리가 줄어들수록 반발력이 급격히 증가하고, 극단적으로 0이 되면 반발력이 무한대로 가기 때문에 반발력이 부족하여 충돌 회피에 실패하는 경우가 없게 된다.

또 다른 문제점은, 기존 방식의 반발력은 모바일 플랫폼의 비홀로노믹 제약 조건을 극복하지 못한다는 점이 있다. 예를 들어, [Fig. 3(a)]와 같이 로봇 말단이 그리퍼를 통해 물체를 파지하여 시작점 S 에서 목표점 G 로 점선을 따라 이동시키는 상황을 가정해 보자. 충돌 방지를 위해서는 적절한 반발력을 발생시켜야 하는데, 기존의 방법에서는 모바일 플랫폼과 물체 간에 가장 가까운 점 P_1 과 P_2 의 연장선 방향으로 반발력의 방향을 설정하고, 식 (4) 또는 (6)에서 구한 크기의 반발력을 발생시켰다. 물체가 모바일 플랫폼과 가까워지면 반발력이 커지고, 이 반발력이 모바일 플랫폼의 순간 속도에 반영되어 플랫폼이 이동함으로써 물체와의 충돌을 회피하게 된다. 그러나 이륜 형태의 차동 구동형 모바일 플랫폼은 [Fig. 3(a)]에서 x 축 방향으로만 순간 속도를 가질 수 있다. 그러므로 그림에서 반발력 \mathbf{F}_r 의 x 축 성분은 x 축 속도에 반영되지만, y 축 성분은 y 축 속도에 전혀 반영되지 못한다. 만약 제자리 회전을 한다면 y 축 방향의 순간 속도가 발생할 수는 있지만, 플랫폼의 원점은 동일하므로 충돌 대상과 멀어지는 못한다. 결과적으로, 기존의 방법에서는 y 축 방향 반발력이 순간 속도에 제대로 반영되지



[Fig. 3] Repulsive force based on CANS (a) for general collision avoidance and (b) self-collision avoidance

못해 충돌 회피에 실패할 가능성이 크다. 여기서 x 축 방향 반발력이 적용되어 충돌을 회피할 수도 있지만, 충돌 대상이 모바일 플랫폼의 측면에 있을 경우 x 축 방향 반발력의 크기가 매우 작거나 0이므로 대부분의 경우 충돌 회피에 실패한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 본 연구에서는 반발력의 크기와 방향을 구하는 새로운 알고리즘인 CANS (Collision Avoidance based on Null Space projection)을 다음과 같이 제안한다.

CANS에서는 반발력을 구할 때 식 (5)와 같은 기존 방식의 반발력 F_r 에 x 축 방향으로 가상의 반발력 f_v 를 추가한다. 이 경우에 물체가 모바일 플랫폼으로 접근함에 따라 모바일 플랫폼이 x 축 방향으로 큰 속도를 가지게 되고, 충돌을 회피하게 된다. 이때 가상의(virtual) 반발력 크기는 P_1 과 P_2 간의 거리가 가까울수록 커져야 충돌의 위험이 있을 때 빠른 속도로 회피할 수 있다. 또한 F_r 에서 x 축 성분의 비중이 크면, 가상의 반발력이 작아도 모바일 플랫폼의 x 축 방향의 순간 속도가 충분히 커서 충돌을 피할 수 있다. 그러나 y 축 성분의 비중이 크면, 모바일 플랫폼의 순간 속도에 반발력이 제대로 반영되지 못하므로 가상의 반발력이 커야 한다. 따라서 다음 식과 같이 거리 기반의 반발력 크기와 F_r 에서 y 축 성분의 비중을 비례하게 가상의 반발력 크기를 정한다. 결과적으로, 가상 반발력의 크기 f_v 는 f_{ry} 와 크기가 같다.

$$f_v(d) = f_r(d) \frac{f_{ry}}{f_r(d)} = f_{ry} \quad (7)$$

가상의 반발력을 위 식과 같이 구하고, 기존의 반발력에 더하면, [Fig. 3(a)]와 같이 반발력의 방향이 변형된 반발력 F_r' 방향으로 변경된다.

[Fig. 3]의 변형된 반발력을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

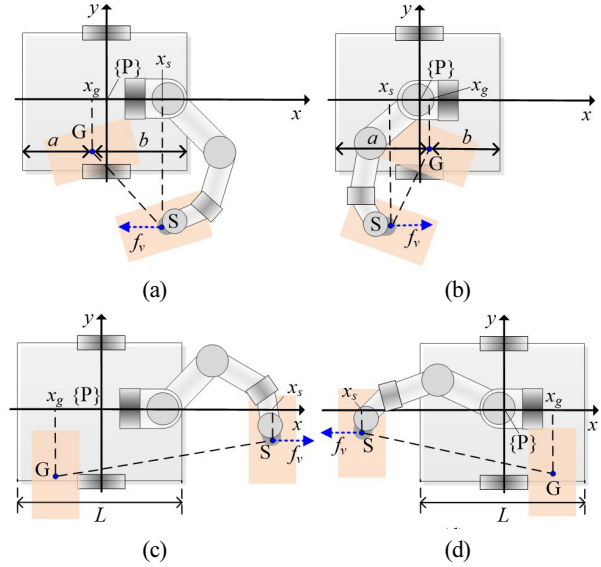
$$F_r' = \{f_{rx}', f_{ry}'\} \quad (8)$$

where

$$f_{rx}' = \begin{cases} f_{rx} + f_{ry} & \text{if } x_s \geq L/2 \\ f_{rx} + f_{ry} & \text{if } -L/2 < x_s < L/2 \text{ \& } x_g \geq 0 \\ f_{rx} - f_{ry} & \text{if } -L/2 < x_s < L/2 \text{ \& } x_g < 0 \\ f_{rx} - f_{ry} & \text{if } x_s \leq -L/2 \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{ry}' = f_{ry} \quad (10)$$

여기서 f_{rx}' 와 f_{ry}' 는 각각 가상의 반발력을 추가한 x 축과 y 축 방향의 반발력, F_r' 은 가상의 반발력을 추가한 반발력 벡터, x_s 와 x_g 는 각각 [Fig. 4]에서 좌표계 $\{P\}$ 에 기준된 로봇 말단의 x 축 시작점(S)과 x 축 목표점(G)이다. 가상의 반발력을 더하는 방향은 x_g 를 기준으로 정한다. [Fig. 4(a)]와 같이 x_g 가 0보다 작으



[Fig. 4] Direction of virtual repulsive force for various cases

면 a 가 b 보다 작으므로, 모바일 플랫폼이 x 축 양의 방향으로 회피하는 것이 효율적이다. 따라서 가상의 반발력을 x 축 음의 방향으로 설정하여 모바일 플랫폼이 x 축 양의 방향으로 순간 속도를 가지도록 한다. 반면에, [Fig. 4(b)]와 같이 x_g 가 0보다 크면 b 가 a 보다 작으므로, 모바일 플랫폼이 x 축 음의 방향으로 회피하는 것이 효율적이다. 따라서 가상의 반발력을 x 축 양의 방향으로 설정하여 모바일 플랫폼이 x 축 음의 방향으로 순간 속도를 가지도록 한다.

그러나 로봇 말단이 x 축 기준으로 플랫폼을 벗어나 있는 경우에는 다음과 같이 처리한다. 우선 [Fig. 4(c)]와 같이 x_s 가 $0.5L$ 보다 크고 x_g 가 0보다 작은 경우, 모바일 플랫폼의 순간 속도는 x 축 양의 방향이고 말단의 경로는 x 축 음의 방향이므로 충돌의 위험이 있다. 따라서 이 경우에는 가상의 반발력을 x 축 양의 방향으로 설정한다. 또한 [Fig. 4(d)]와 같이 x_s 가 $-0.5L$ 보다 작고 x_g 가 0보다 큰 경우, 모바일 플랫폼의 순간 속도는 x 축 음의 방향이고 말단의 경로는 x 축 양의 방향이므로 충돌의 위험이 있다. 따라서 이 경우에는 가상의 반발력을 x 축 음의 방향으로 설정한다. 이때 목표점 G는 플랫폼에 고정된 점이 아니라, 플랫폼에 상관없이 공간상의 점임에 유의한다.

다음으로, 식 (8)에서 구한 반발력을 매니플레이터에 적용시키기 위해서 다음과 같이 반발력을 자코비안을 통해 매니플레이터의 각 축에 대한 토크로 변환하고, 여기에 변환 인자를 곱하여 반발 속도로 변환한다.

$$J_a^T F_r'(d) = \tau_r \quad (11)$$

$$b = k_t \tau_r = \dot{q}_r \quad (12)$$

여기서 J_a 는 매니플레이터 암의 자코비안, τ_r 은 반발력에 대응되는 반발 토크 벡터, \dot{q}_r 은 반발력에 대응하는 매니플레이터

각 축의 반발 속도, k_i 는 반발 토크를 반발 속도로 변환하여 주는 인자이다. 본 연구에서는 식 (6)의 k_i 을 통해 반발력의 크기를 조정하므로 k_i 는 1을 사용한다. [Fig. 3(a)]와 같이 물체와 모바일 플랫폼의 충돌은 매니플레이터 말단과 물체를 하나의 강체로 보고 충돌을 회피하기 때문에 J_a 를 사용하여 매니플레이터 말단에 반발력을 적용한다. 반발력을 반발 속도로 변환하여 식 (3)의 b 에 대입하면, 말단 궤적을 유지하면서 모바일 플랫폼과 물체와의 충돌을 회피하도록 반발력이 적용된다.

한편, [Fig. 3(b)]와 같이 매니플레이터와 모바일 플랫폼 사이의 충돌을 회피하도록 적용하면 CANS 알고리즘을 자가 충돌 회피에도 확장하여 적용할 수 있다. 매니플레이터와 모바일 플랫폼 사이의 가장 가까운 두 점 P_1 과 P_2 를 구하고, 반발력의 방향과 크기는 앞서 설명한 방법과 동일하게 구한다. 그러나 반발력을 적용하는 대상을 로봇 말단으로 선정하면 P_1 과 P_2 가 아닌 P_1 과 P_3 이 멀어지도록 반발력이 발생된다. 따라서 반발력이 적용되는 대상을 P_2 가 포함된 링크의 말단으로 선정해야 P_1 과 P_2 가 멀어지도록 반발력이 발생된다. 따라서 다음 식과 같이 자코비안 역시 J_a 가 아닌 P_2 가 포함된 링크까지의 자코비안을 적용한다.

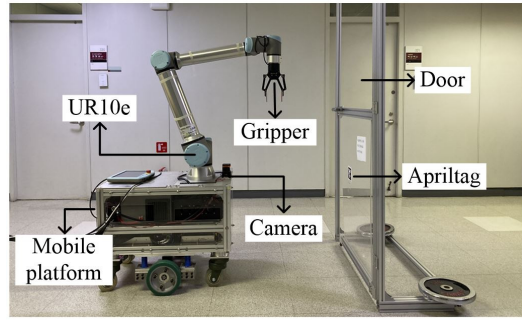
$$J_i^T F_r'(d) = \tau_r \quad (13)$$

여기서 i 는 모바일 플랫폼과 가장 가까운 매니플레이터 링크 번호, J_i 는 링크 i 까지의 자코비안이다. 위 식과 같이 반발력을 반발 속도로 변환하여 식 (3)의 b 에 대입하면, 말단 궤적을 유지하면서 모바일 플랫폼과 매니플레이터의 자가 충돌을 회피하도록 반발력이 적용된다.

전체 알고리즘에 대한 이해를 돕기 위해 다음과 같이 수치를 포함한 예시를 들어 설명한다. 매니플레이터가 [Fig. 3(b)]와 같이 $q = \{45^\circ, -150^\circ, -110^\circ, -20^\circ, 80^\circ, 0^\circ\}$ 인 자세에 있는 순간의 자가 충돌 회피에 대해서 생각해 보자. 먼저 GJK 알고리즘을 통해 거리 $d = 0.25$ m를 구한다. 다음으로, 식 (5)과 (9)에 의해 $f'_{rx} = 1.61, f'_{ry} = -1.05$ 를 구한다. f'_{rx} 가 양수이므로 반발력의 방향은 x 축 양의 방향이다. 다음으로, 반발력을 반발 속도로 변환하여 영공간에 반영하면 식 (3)의 영공간 속도 $\dot{q}_{null} = \{21\%/s, -1.7\%/s, 16\%/s, -17\%/s, 2.5\%/s, 16\%/s, -0.28$ m/s, $-5.1\%/s\}$ 를 구할 수 있다. \dot{q}_{null} 에서 모바일 플랫폼의 영공간 속도가 -0.28 m/s로 충돌을 회피하기 위해 x 축 음의 방향으로 속도 성분을 가지게 된다. 위 예시처럼 실시간으로 반발 속도를 구하여 로봇 말단이 움직일 때 충돌을 회피한다.

4. 실험 결과

충돌 회피 알고리즘의 검증을 위해 자가 충돌 회피와 문 열기

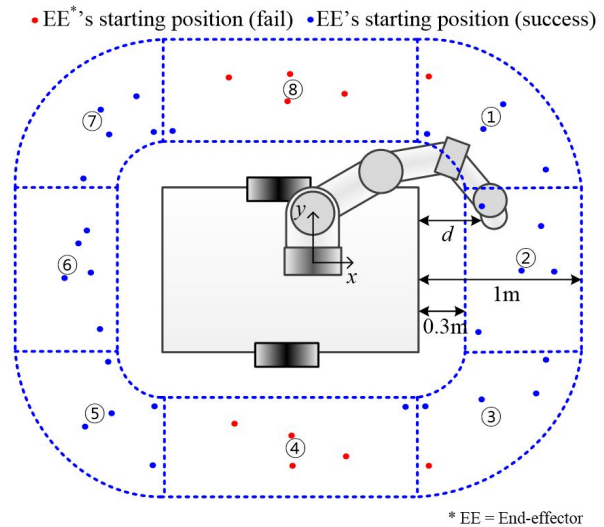


[Fig. 5] Experimental setup

실험을 진행하였다. 문 열기 작업을 위한 실험 환경은 [Fig. 5]와 같다. 모바일 플랫폼은 자체 제작한 차동형 모바일 플랫폼이고, 매니플레이터는 Universal Robot의 6자유도 매니플레이터 UR10e를 사용하였다. 추가로 Apriltag 인식을 위하여 Intel RealSense 카메라를 사용하였고, 문 손잡이 파지를 위하여 Robotiq 2F-140 2지 그리퍼를 사용하였다.

4.1 자가 충돌 회피 실험

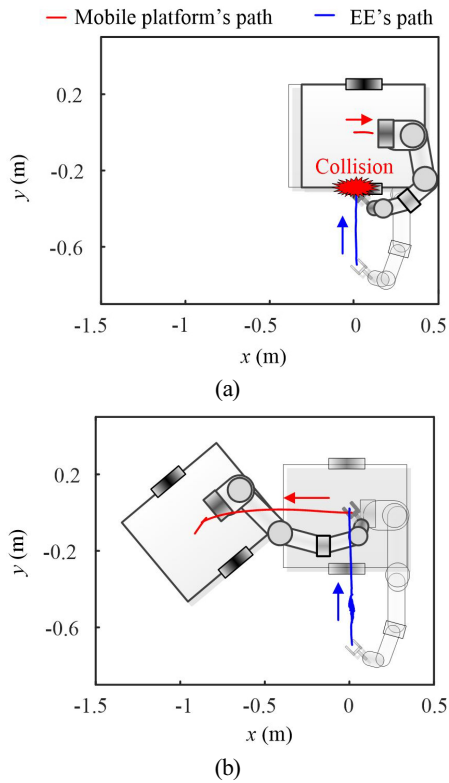
모바일 매니플레이터의 자가 충돌 회피 실험의 조건은 다음과 같다. [Fig. 6]의 영역 ①~⑧ 내부의 무작위 위치에 로봇 말단을 위치시켜 모바일 플랫폼의 중심으로 매니플레이터의 말단을 이동하였고, 이 작업을 영역별로 5회 반복하였다. 매니플레이터 말단과 모바일 플랫폼의 거리가 너무 가까우면 궤적의 시작부터 매우 큰 반발력을 가지게 되어 로봇의 최대 속도를 초과할 가능성이 있다. 또한 링크 길이가 정해져 있으므로 로봇 말단이 일정 거리 이상 떨어질 수 없다. 따라서 d 는 $0.3 \sim 1$ m의 범위 내에서 정하였다. 실험은 기존 방식과 제안한 CANS 방식의 두 가지로 진행하여 비교하였다.



[Fig. 6] Experimental condition and results of conventional method^[2]

먼저 기존 방식의 장애물 회피 방법^[2]을 적용하면, 매니퓰레이터의 위치에 따라 [Fig. 7(a)]와 같이 자가 충돌이 발생할 수 있다. 특히 [Fig. 6]의 영역 ④와 ⑧에서 성공률이 낮았는데, 비홀로노믹 제약 조건으로 인해 y 축으로 반발력을 반영하지 못한 결과로 볼 수 있다. 결과적으로, [Table 1]과 같이 총 40번의 실험에서 30번 성공하였다.

다음으로, 제안된 방식인 CANS의 충돌 회피 알고리즘을 적용하면, 앞서 충돌이 발생하였던 [Fig. 7(a)]의 경우와 달리 [Fig. 7(b)]와 같이 자가 충돌 회피에 성공한다. 결과적으로,



[Fig. 7] Self-collision avoidance path of (a) conventional method^[2] and (b) CANS

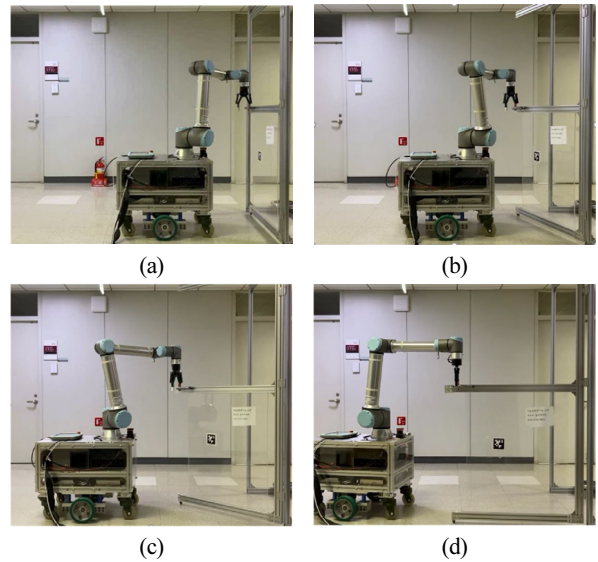
[Table 1] Experiment results of self-collision avoidance

Starting Area	Success rate	
	Method ^[2]	CANS
①	4/5	5/5
②	5/5	5/5
③	4/5	5/5
④	1/5	5/5
⑤	5/5	5/5
⑥	5/5	5/5
⑦	5/5	5/5
⑧	1/5	5/5
Total	30/40	40/40

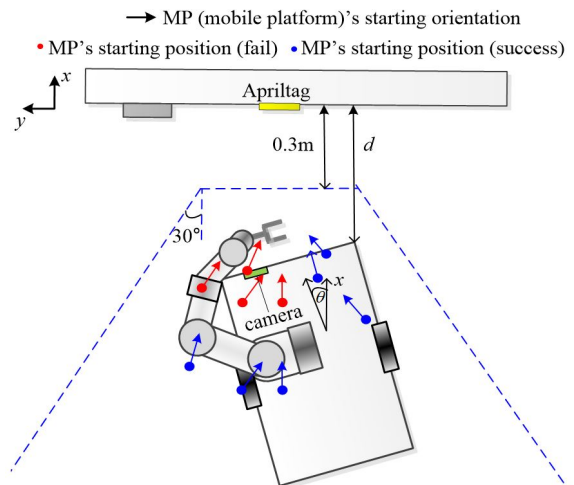
[Table 1]과 같이 총 40번의 실험에서 40번 모두 성공하였다.

4.2 문 열기 실험

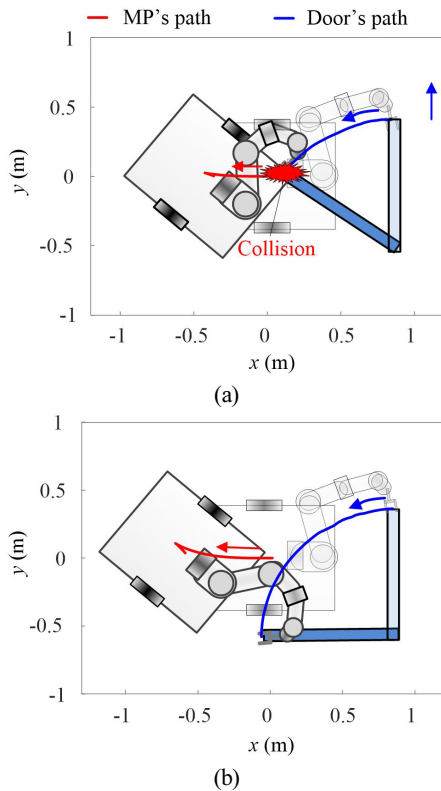
모바일 매니퓰레이터를 이용한 문 열기 실험을 [Fig. 8]과 같이 다음과 같은 순서로 진행하였다. 먼저 모바일 매니퓰레이터가 문으로 접근한 다음, Apriltag로 문 정보를 입수하고, 문 손잡이를 과지한다. 마지막으로, 통합 제어를 통해 로봇 팔단이 원호 궤적을 따라 문을 연다. 본 연구에서의 실험 조건은 다음과 같다. [Fig. 9]의 점선 영역 내부의 무작위 위치에 모바일 플랫폼을 위치시키고, 문 열기를 시도한다. 모바일 플랫폼의 각도에 따라 카메라가 Apriltag를 인식하지 못하는 경우가 발생할 수 있으므로, θ 는 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 사이로 정하였다. 또한, 문



[Fig. 8] Snapshot of door opening experiment at (a) 0 sec and (b) 5 sec and (c) 10 sec and (d) 15 sec



[Fig. 9] Experimental condition and results of conventional method^[2]



[Fig. 10] Door opening path of (a) conventional method^[2] and (b) CANS

[Table 2] Experiment results of door opening

Success rate	
Method ^[2]	CANS
6/10	10/10

과 모바일 플랫폼의 거리가 너무 가까우면 궤적의 시작부터 매우 큰 반발력을 가지게 되어 로봇의 최대 속도를 초과할 가능성이 있으므로, d 는 0.3 m 이상으로 정하였다. 실험은 기존 방식과 제안한 CANS 방식의 두 가지로 진행하여 비교하였다.

먼저 기존 방식의 장애물 회피 방법^[2]을 문 열기에 적용하면, 처음 문에 접근하는 자세에 따라 [Fig. 10(a)]와 같이 궤적 중간에 문과 모바일 플랫폼의 충돌이 발생할 수 있었다. 결과적으로, [Table 2]와 같이 총 10번의 실험에서 6번만 성공하였다. 다음으로, 제안된 CANS 방식의 충돌 회피 알고리즘을 적용하면, [Fig. 10(b)]와 같이 문과 모바일 플랫폼의 충돌을 회피하면서 문 열기에 성공하였다. 결과적으로, [Table 2]와 같이 총 10번의 실험에서 모두 성공하였다.

5. 결론

본 연구에서는 모바일 매니퓰레이터의 통합 제어 수행 시에 말단의 궤적을 유지하면서도 물체와의 충돌을 회피하기 위해서, 모바일 매니퓰레이터의 영공간 투영을 이용한 여자유도

제어에 기반한 충돌 회피 방법인 CANS을 제안하였다. 모바일 플랫폼의 순간 속도 방향으로 비홀로노믹 제한 조건을 고려한 가상의 반발력을 적용하여, 어떤 상황에서도 충돌 회피가 가능하도록 하였다.

자가 충돌 회피 실험과 문 열기 실험에서, 기존의 방식은 75% 및 60%의 성공률에 얻은데 비해서, CANS 알고리즘을 적용하면 두 실험 모두 100%의 성공률을 얻을 수 있었다.

향후 연구에서는 매니퓰레이터 링크 간의 충돌이나, 물체와 매니퓰레이터의 충돌까지 고려하여 충돌 회피를 할 수 있는 알고리즘을 개발할 예정이다.

References

- [1] M. Mashali, "Kinematic Control of Redundant Mobile Manipulators," Ph.D. thesis, University of South Florida, USA, 2015, [Online], <https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7185&context=etd>.
- [2] O. Brock, O. Khatib, and S. Viji, "Task-consistent obstacle avoidance and motion behavior for mobile manipulation," 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, 2002, DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1013391.
- [3] M. Li, Z. Yang, F. Zha, X. Wang, P. Wang, P. Le, Q. Ren, and F. Chen, "Design and analysis of a whole-body controller for a velocity controlled robot mobile manipulator," Science China Information Sciences, 2020, DOI: 10.1007/s11432-019-2741-6.
- [4] D. Gonon, J. Dominic, F. Péter, and H. Marco, "Safe Self-collision Avoidance for Versatile Robots Based on Bounded Potentials," 11th Conference on Field and Service Robotics, Zurich, Switzerland, 2017, DOI: 10.3929/ethz-b-000216503.
- [5] A. Dietrich, T. Wimböck, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, "Integration of reactive, torque-based self-collision avoidance into a task hierarchy," IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, no. 6, 2012, DOI: 10.1109/TRO.2012.2208667.
- [6] J. Leoro and T. Hsiao, "Motion Planning of Nonholonomic Mobile Manipulators with Manipulability Maximization Considering Joints Physical Constraints and Self-Collision Avoidance," Applied Sciences, vol. 11, no. 14, 2021, DOI: 10.3390/app11146509.
- [7] K. Jang, S. Kim, and J. Park, "Reactive Self-Collision Avoidance for a Differentially Driven Mobile Manipulator," Sensors, vol. 21, no. 3, 2021, DOI: 10.3390/s21030890.
- [8] M. Montanari, N. Petrinic, and E. Barbieri "Improving the GJK Algorithm for Faster and More Reliable Distance Queries Between Convex Objects," ACM Transactions on Graphics, vol. 36, no. 30, pp. 1-17, 2017, DOI: 10.1145/3083724.
- [9] M. G. Park, J. H. Jeon, and M. C. Lee, "Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field approach with simulated annealing," IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), vol. 3, pp. 1530-1535, 2001, DOI: 10.1109/ISIE.2001.931933.



김 계 진

2018 고려대학교 기계공학과(학사)
2020~현재 고려대학교 기계공학과(석사)

관심분야: 모바일 매니플레이터, 여자유도 제어, 통합 제어



윤 인 환

2019 서강대학교 기계공학과(학사)
2019~현재 고려대학교 메카트로닉스협동
과정(석박통합)

관심분야: 로봇 제어, 로봇 기반 조립



송 재 복

1983 서울대학교 기계공학과(공학사)
1985 서울대학교 기계공학과(공학석사)
1992 MIT 기계공학과(공학박사)
1993~현재 고려대학교 기계공학부 교수

관심분야: 로봇의 설계 및 제어, 협동로봇, 중력보상 로봇, AI 기반
로봇 매니플레이션