

파이프 체결을 위한 3차원 측정 및 기구적 구속조건 기반의 설계 방식

Designs of Pipe Fitting with Three Dimensional Measurement and Kinematic Constrained Equations

양정연

목원대학교 AI로봇융합학과

Jeong-Yean Yang(jyyang@mokwon.ac.kr)

요약

선박은 다양한 파이프 배관을 필요로 하는 거대한 시스템에 해당한다. 내부의 복잡한 파이프를 배치하는 것은 설계 도면을 따라 진행되지만, 실제 현장에서는 측정 및 시공 오차에 의해 파이프간 체결 위치가 서로 맞지 않는 경우가 다수 발생하게 된다. 이러한 경우, 연결할 양쪽 파이프의 위치를 측정하여 어긋난 위치를 보정하는 파이프 체결부를 새로 설계하여 연결작업을 완료하게 된다. 본 연구는 이러한 오차를 가진 파이프 체결 공정을 기술적 접근을 통해 보완하고자 한다. RGBD 센서의 질점 정보를 이용하여 파이프 위치를 측정하고 양쪽 파이프간의 상대적 위치, 방향의 틀어짐을 로봇의 역기구학으로 해석하여 체결부 파이프의 외관을 보정, 설계하는 방법론을 제시하고자 한다. 파이프의 위치 측정을 위한 질점기반의 정합 과정 및 확률 기반 접근론인 RANSAC을 이용하여 파이프의 좌표계를 추정하고 실험을 통해 제시한 방법의 정확도를 논하고자 한다. 또한 파이프 체결부 설계를 위해 최소한의 자유도를 이용하여 연결가능한 기구학적 정보의 추출 방법론을 다루고자 한다.

■ 중심어 : | 파이프 체결 | 기구적 구속조건 | 질점 매칭 | 선박 배관 |

Abstract

Ship is a huge system including a variety of pipe arrangements. Pipes are installed according to the design layout, however the end position of pipes are not well matched owing to its measurement and construction errors. In this situation, the customized pipe fitting is frequently designed to connect with both pipes, the position of which are manually measured. This paper focused that these two coordinates are measured by point cloud from RGBD sensor and the relative transformation induced by positional and orientational differences is calculated by inverse kinematics in robotics theory. Therefore, the result applies for the methodology of the pipe connection design. The pipe coordinate that is estimated by the matching and the probabilistic RANSAC method will be verified by experiments. The kinematic design parameters are computationally calculated by using the minimum degree of freedom that connects both pipe coordinates.

■ keyword : | Pipe Fitting | Kinematic Constraint | Point Cloud Matching | Ship Pipe Design |

I. 서론

선박의 건조과정은 크게 선체 설계와 의장 설계로 구분된다. 선박의 유형에 따라 구조를 설계하는 선체 설계와 달리 의장 설계의 경우, 선박의 내부 구성을 위한 선실, 전장, 배관 설계를 포함한다.

이러한 선박 건조의 경우, 외형의 크기 및 하중에 의해 정확도 측면의 문제점이 다수 거론된다. 선박의 내구성과 운항 효율의 측면 때문에 선체 설계와 건조 과정의 공정에 대한 중요성이 강조되는 반면, 의장 부분은 상대적으로 정확성에 대한 고려가 낮은 편이다.

배관의 위치 정확도가 요구되는 분야로는 건설, 토목업이 있다. 좁은 환경 및 철제 외피를 갖는 선박 건조와 비교하여 건설의 경우 보다 측정이 용이한 장점을 갖는다. 대형 건물의 축조 시에는 선박과 마찬가지로 배관의 위치에 대한 정확성, 현장 상황에 따른 잦은 설계 변경 등의 문제점이 있다.

최근 건설 현장에서는 센서 및 로봇기술을 활용한 첨단 제조 공정에 주목하고 있다. 현장의 요구에 따른 설계 변경에 따른 정보 교환의 편의를 위해 3차원 측정 방식을 적용하거나, 배선, 배관의 위치를 추적관리하는 3차원 측위 및 CAD 기반의 정보 관리, 모의 실험에 대한 연구가 진행 중이다[1][2].

위치 측위기술과 로봇 기술의 발전에 따라 건설과 유사한 선박 건조에도 일부 적용이 진행되고 있다. CAD 모델과 결합하여 선박의 내부를 가상으로 표현 및 공정을 관리하는 용도로 활용하고 있다. 선박 의장의 경우, 복잡하고 넓은 선박 내부를 가상환경과 증강 가상을 이용하여 가상화하여 설비를 디지털 트윈 방식으로 시각화하는 연구가 진행되었다[3]. 또한 안전사고 방지를 위해 선박 외부의 용접, 검수, 도장 작업을 위해 로봇을 이용하여 자석 또는 흡착 패드를 이용한 이동 로봇을 적용하는 연구가 진행되었다[4].

반면, 이러한 위치 측위 및 로봇 기술을 선박 내부에 적용하는 것은, 좁은 공간적 제약에 의해 많은 어려움이 있다. 특히 배관의 경우, 넓은 선실과 달리 좁고 접근이 어려운 벽 주위에 밀집되어 있어 센서의 제한된 시야각과 최소 측정 거리의 한계가 있으며 계단 및 노면의 미끄러짐에 의한 이동성 확보도 문제점이 있다.

선박 배관은, 기관실 및 일부 거주 공간을 제외한 전 구역을 대상으로 하여 냉난방 공조, 증기 및 연료 가스, 용수 등의 이송을 목표로 설계된다.

일반적으로 가장 많이 쓰이는 배관재료는 철을 이용한 강관으로 목적에 따라 탄소강, 합금강, 스테인레스 등의 재질로 구성된다. 또한 이러한 파이프를 선박내의 공간 내에 배치함에 따라 직선 뿐 아니라 곡선형의 엘보우(Elbow), 90도로 분리되는 티(Tee) 형상을 통해 좁은 선박 공간 내에 모양을 만들어 정렬 및 배치하고 있다.

대형 선박의 경우 위치 오차도 증가하기 때문에, 내부의 배관을 배치하는데 있어서 정확도에 따른 파이프 간 체결의 문제점이 다수 발생하게 된다. 서로 다른 구역에 배치된 파이프가 서로 연결되는 지점에서 각 구역 간의 오차에 의해 파이프의 끝단이 설계와 달리 어긋나 버리는 문제점이 있다.

선박 배관의 경우, 직경이 50~350mm에 해당하는 파이프가 많이 사용되기 때문에 위치 오차에 의해 어긋난 파이프를 연결하기 위해서는, 표준형의 엘보우나 티이를 대신하여 특수한 파이프 체결 형상으로 커스터마이징을 적용하는 실정이다.

실제 현장에서는 이러한 체결부 위치 오차 문제를 해결하기 위해, 파이프 간 상대 위치를 수작업으로 측정하고 체결부를 새로 설계하는 방식을 사용하고 있다. 1차원의 레이저 거리기를 이용하여 상대위치를 측정하기 때문에 정확한 각도, 위치의 파악에 어려움이 많아 커스터마이징된 체결부 또한 현장에서의 간단한 성형을 통해 오차를 줄이는 반복적 시공에 의존하고 있다.

이러한 파이프 체결부의 수작업에 의한 커스터마이징은, 파이프 형상에 따른 수두 손실을 유발하기 때문에 시공 단계에서부터 파이프의 설계 및 설치의 오차를 감소하는 것이 바람직하다.

하지만 대형 선박의 경우 시공과정에서 누적 오차가 지속적으로 발생하며, 파이프 배치를 직선으로 유지하여 수두 손실을 최소화하고 있기 때문에 체결부의 오차 극복을 위한 필요성이 지속적으로 발생하고 있다.

본 논문에서는, 이러한 파이프 체결부의 측정과 맞춤형 설계에 대한 방법론을 제시하여, 위치 측위 및 로봇 기술이 적용된 배관 체결 공정을 제안하고자 한다. 배

관이 위치한 좁은 선박 내 공간에서의 위치 측위 가능성과 정확도에 대한 실험과 함께, 파이프 커스터마이징을 위한 기구적 해의 수치해석적 방법론을 적용하고자 한다.

II. 파이프 체결부 모델링

배관 시공 현장에서는 아래 [그림 1]처럼 양쪽 배관간의 방향이 맞지 않아 가운데와 같이 새로 파이프 체결부를 새로 설계, 가공하는 경우가 발생한다.

파이프의 지름이 큰 경우에는 현장에서의 가공이 불가능하며, 외부에서 가공한 뒤 이를 장착하는 방식으로 진행된다. 이러한 체결 방식의 정확도 증가 및 체결부의 설계 파라미터 추출을 위해 다음과 같은 방법론을 적용하고자 한다.

- 1) 양쪽 파이프의 위치 차이를 측정하기 위해 RGBD 센서를 이용하여 파이프의 외형 정보를 측정한다.
- 2) 한쪽 파이프를 원점으로 하여 최소한의 구부러짐을 갖는 파이프 체결부의 기구적 파라미터를 계산한다.
- 3) 해당 파라미터를 이용하여 파이프를 구부려, 최적화된 체결부를 제작한다.

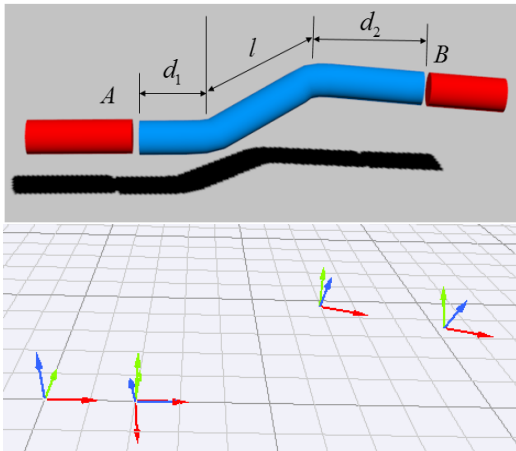


그림 1. 파이프 체결부의 설계 부분(상) 및 가운데 체결 부위의 2자유도 동차 변환 예(하)

RGBD 센서를 통해 해당 환경의 3차원 질점 정보를 추출하면 양 파이프의 외관 모델 정보를 토대로 파이프

의 좌표계를 추정할 수 있다. 이를 이용하여 3차원 공간상의 동차 행렬(Homogeneous Matrix)로 양 파이프간의 좌표 변환 관계의 유도가 가능하다.

양쪽 파이프의 체결부 설계의 경우, 최소 1회, 최대 2회 구부림 가공으로 맞춤형의 파이프 체결부를 가공하는 설계 변수를 도출하고자 한다. 이러한 최대 2회 구부림과 파이프 체결부의 회전을 고려하면 이는 3자유도 로봇팔의 기구적 구속조건으로 표현 가능하다.

로봇의 기구적 표현은 관절의 길이가 고정되어 각도 변화에 따른 위치 문제로 표현되나, 제시된 모델은 관절 회전뿐 아니라 설계 파라미터인 링크부의 길이를 포함하는 등제한 조건(Equality Constraints)을 이용한 최적화 기법을 적용하는 것에 해당한다.

본 논문은 크게 두 가지 영역으로 구성되어, III장은 3차원 질점을 이용한 파이프 끝단의 좌표계 추출 방법을 다루고, 이후 IV장에서 파이프를 연결하는 체결부의 기구적 파라미터 추출을 위한 수치해석적 방법론, V장에서 제시한 방법론의 실험 기반 결과로 구성된다.

III. 파이프 좌표계 측정

1. 3차원 질점기반의 측정 방식

양 파이프간의 체결을 위해서는, 파이프 간의 상대적 좌표 변환 수식을 추출하는 것이 필요하다. 이를 위해 레이저 기반의 3차원 RGBD 스캐너를 이용하여 파이프 끝단의 좌표계 추출 방식을 사용하고자 한다. 3차원 RGBD 스캐너로는 인텔 리얼센스를 활용하였다.

스캔된 3차원 질점은 약 70만개로 파이프외의 주변 정보를 포함하고 있어, 필터링을 거쳐 파이프의 3차원 모델 정보와 매칭을 통해 좌표계를 추출한다.

RGBD 센서의 위치를 원점으로 양쪽 파이프를 동시 측정하는 경우, 3차원 질점 정보 내에서 파이프를 분리 추출하는 측정상의 장점이 있으나 좁은 환경에서는 스캐너의 화각 제한에 따른 단점이 있다. 이처럼 좁은 공간에서는 스캐너의 위치를 토대로 기준점을 결정하고 양쪽 파이프를 따로 측정한 뒤, 기준점을 토대로 양쪽 3차원 질점 정보를 정렬 매칭하는 방식을 적용한다.

2. 질점의 매칭 기법

3차원 질점의 매칭은 가까운 질점을 통해 공간에서의 변환을 구하고 샘플을 변환하여 다시 가까운 질점을 찾는 반복적 방법론인 Iterative Closest Point(ICP)를 적용한다. ICP 방법론은 공간상의 근사점을 찾기 위해 3차원 KD 트리를 적용하여 다음과 같은 비용함수를 최소화하도록 등차 변환 함수를 계산한다.

$$E = \sum_i [(Rp_i + T - q_i) \cdot n_i]^2$$

$$n_i = (q_i - p_i)_u$$

이때 p_i 는 변환하고자 하는 측정된 샘플상의 한 점이며, q_i 는 대상인 모델의 한점으로 정의한다.

위의 비용함수를 이용하여 선형화된 회전 행렬, R 과 이동 벡터, T를 구할 수 있다. R은 선형화된 벡터, r로써 α, β, γ 로 구성되며 T는 t벡터인 x, y, z 로 표현되어 최소값을 갖는 경도가 0이 되는 수식으로 변환된다.

$$E = \sum_i [(p_i - q_i) \cdot n_i + t \cdot n_i + r \cdot (p_i \times n_i)]^2$$

$$\nabla E = \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha}, \frac{\partial E}{\partial \beta}, \frac{\partial E}{\partial \gamma}, \frac{\partial E}{\partial t_x}, \frac{\partial E}{\partial t_y}, \frac{\partial E}{\partial t_z} \right) = 0$$

선형화된 수식의 해를 구해 회전 행렬 R과 이동 T를 구하여 최종 등차변환 행렬을 구할 수 있다. 이러한 ICP 방법론의 경우, 모델, M과 달리 측정값, S에 주변 요소가 포함되어 있기때문에 랜덤 샘플을 이용한 RANSAC (Random Sample Consensus)이 적용된다. 이는 질점으로 구성된 M과 S 사이의 일부 유효 질점간의 매칭을 수행하는데 적합하다[5][6].

파이프의 형상을 추출하기 위해, 아래와 같은 원기둥 형상의 질점을 다음 수식을 통해 생성하였다.

$$x = r \cos(q), y = r \sin(q) \quad q_{\min} < q < q_{\max}$$

$$z_{\min} < z < z_{\max}$$

이 때, 원기둥의 각도, q의 경우, 3차원 스캐너와의 거리 및 포커스 각도에 따라 측정되는 원기둥의 표면이

180도 보다 작기 때문에 . 원기둥의 각도, θ 는 파이프의 반지름과 거리의 수식으로 다음 [그림 2]처럼 정의된다.

다음 수식처럼, 거리에 비해 반지름이 작을수록 레이저가 닿는 측정 가능한 각도가 커지지만, 거리가 멀어질수록 반지름과 각도간 관계가 작아져 파이프의 원기둥 형상에 대한 판단에 어려움이 생기게 된다.

$$r \tan \theta = d$$

$$\frac{d\theta}{dr} = -\frac{\cos \theta \sin \theta}{r} = -\frac{\sin^2 \theta}{d}$$

또한 반사된 레이저를 측정하기 때문에 스캐너의 포커스 각이 약 40도에 해당하며 점점 부근의 빛이 좁은 카메라 화각안으로 들어오지 못하기 때문에 측정이 불가능한 것으로 판단된다. 충분한 거리가 주어져 있다고 가정할 경우, 최대 반사 가능한 각도 θ 는 실험으로 약 55도에 해당한다.

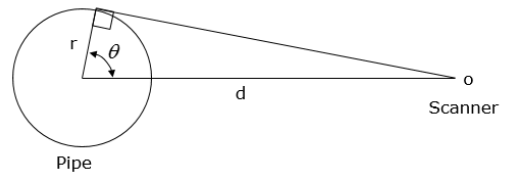


그림 2. 측정 가능한 파이프의 모델

3. 주변부 필터링 방식

파이프 주변의 다른 구조물에 의해 파이프 측정 샘플과 모델 간의 매칭이 진행되기 어렵기 때문에, 주변 영역을 제거하는 것이 필요하다. 이를 위해 양쪽 파이프의 기준이 될 수 있는 바닥면을 토대로 1차 정렬 작업을 수행하였다.

바닥면의 모델 데이터는 $z=0$ 인 임의의 평면 데이터를 생성하여 RANSAC을 이용한 [그림 3] a와 같은 1차 정렬을 수행한다. 불필요한 바닥면 주변의 질점 제거를 위해 $z=0$ 평면의 주변 질점을 높이를 이용하여 필터링 하였다.

[그림 3] b에서는 파이프 주변부의 개체간의 분리를 위해 K-mean 클러스터링 방법을 적용하였다. 파이프 주변부의 경우, 각 개체가 공간상의 군집을 이루고 있어 클러스터링을 통해 수차례의 적은 연산량을 토대로

[그림 3] c와 같이 주변부가 최대한 제거된 파이프 주변 질점을 추출할 수 있다.

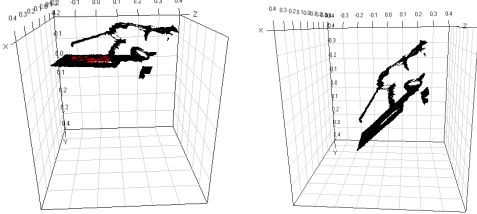


그림 3. (a) 바닥 정보에 기반한 정렬과정. 각 데이터는 원본(좌) 및 바닥 정렬후(우)에 해당함

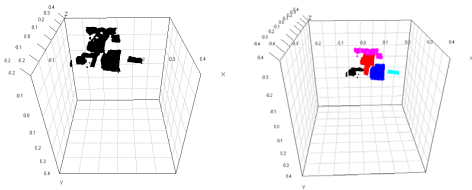


그림 3. (b) 바닥을 제거 결과(좌) 및 클러스터링에 의한 분류 결과(우)

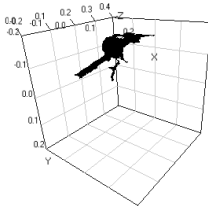


그림 3. (c) 최종 필터링 작업에 의한 파이프 주변부

4. RANSAC 기반의 파이프 좌표계 추출

파이프 측정값과 모델간 매칭은 RANSAC을 이용한 2단계 작업으로 구성하였다. 측정값에서 랜덤 샘플을 추출하여 모델과 ICP 매칭을 시도하고, 전체 측정값과 근사한 질점의 개수를 이용하여 가장 매칭이 잘 되는 동차 변환을 얻어낼 수 있다.

[그림 4] a는 최소 100여번의 RANSAC에 의한 1단계 매칭의 결과이다. 이후 [그림 4] b와 같이 1단계 결과를 토대로 실제 파이프 질점을 분리한 후 2단계로 파이프 부분의 RANSAC 정렬을 시도하였다. 파이프의 곡면 대한 매칭을 수행하기 때문에, 동차 행렬의 오차를 줄이기 위해 2단계에서 전체 곡면의 질점에 대한 매

칭을 통해 불특정 곡면을 정교하게 보정하고자 하였다.

ICP 매칭 방법은 주변부 근사점을 찾아 반복적 수렴하는 방식을 사용하기 때문에 초기 위치에 따른 국부적 수렴성을 갖는다. 따라서, RANSAC을 적용하더라도 비교적 적은 양의 샘플을 이용하여 1단계에 빠르게 적합한 초기 위치를 찾고, 이어서 2단계에 정교한 모델을 이용하여 최종 동차 변환 수식을 얻어 파이프의 위치 탐색 속도의 증가와 위치 정확성을 확보하고자 하였다.

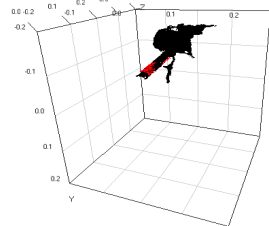


그림 4. (a) RANSAC에 의한 1차 정렬 상태 예시

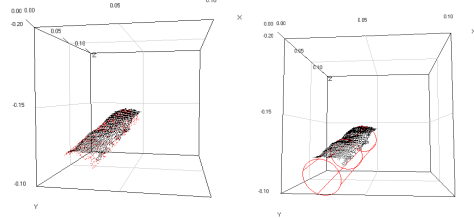


그림 4. (b) 2차 정렬에 의한 최종 위치 추출 사례. 샘플 매칭 결과(좌) 및 샘플 파이프 모델 매칭(우)

IV. 기구적 구속조건에 의한 체결부 설계

3D 스캐너에 의해 양쪽 파이프 A, B의 끝단 좌표계를 추출하여 각각 H_A, H_B 라 정의한다. 이 때 파이프 체결부는 A 지점을 원점으로 하는 3 자유도 로봇팔의 설계 방식과 동일하다. 일반적인 로봇은 관절각도만으로 구성되는 반면, 주어진 문제의 경우, 로봇의 베이스 좌표계의 오프셋은 d_1 , 링크 1은 길이 l , 링크 2는 길이 d_2 를 포함한다. 이를 로봇 정기구학 수식으로 표현하면 다음과 같다[7].

$$\hat{X} = f(q_1, q_2, q_3, d_1, l, d_2) = ({}^0H_A)^{-1} {}^0H_B = {}^4H_B$$

이에 따라 끝단인 B의 경우, 관절각 3개와 길이 3개의 정기구학 수식으로 표현되며 끝단 B는 공간상의 위치 3개와 피치, 요우각의 구속조건을 갖게 된다. 끝단 B의 경우, 롤 각도는 파이프 B의 회전이 가능하므로 구속조건으로 고려하지 않는다. 이에 따라, 위의 식에 따른 동차행렬의 회전요소를 r_{ij} 로 표현하면 r_{11}, r_{31} 를 통해 피치와 요우를 표현할 수 있다.

즉,

$$r_{11} = \cos(\alpha)\cos(\beta)$$

$$r_{31} = -\sin(\beta)$$

이며, 이때 α 는 요우각, β 는 피치각을 의미한다. 이를 이용하여 x,y,z 위치 및 앞서의 두 각도로 구성된 5개의 구속조건을 만족하는 수식은 파이프 길이를 최소화하는 최적화 문제로 설계할 수 있다. 이는 다음과 같다.

$$J = d_1^2 + d_2^2 + l^2 + \sum_i^5 \lambda_i g_i(q_1, q_2, q_3, d_1, l, d_2)$$

이때, J는 목적함수로서 라그랑지 방법을 통해 5개의 기구적 구속조건, g_i 를 포함하고 있다[8] λ 는 라그랑지 변수로 5개의 구속식에 대해 적용된다. 이러한 J의 최소값은 미분을 통해 3개 관절각, 3개의 길이, 5개의 라그랑지 변수 λ 로 다음처럼 표현가능하다.

$$\partial_i J = F_i(q_{1,2,3}, d_{1,2}, l, \lambda_{1,2,3,4,5}) = 0$$

이 식의 경우, 총 11개의 변수를 가진 연립 방정식, F_i 로 정리된다. 해당 방정식의 경우, 각도 q에 의해 비선형 방정식에 해당하므로 수치 기반의 자코비안(Jacobian) 역행렬을 이용한 비선형 뉴튼-랩슨 방법(Nonlinear Newton-Raphson method, NR)으로 반복적으로 처리하였다[9]. 이는 다음 수식과 같다.

$$\hat{P} = (q_1, q_2, q_3, d_1, l, d_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$$

$$\hat{P}' = \hat{P} - \alpha \partial F^{-1} F$$

이 때, ∂F 는 11개의 방정식, F에 대한 11x11의 자코

비안 행렬이며, α 는 수렴성 개선을 위해 추가하여 파라미터 P의 변화를 작게 업데이트하도록 하였다.

V. 실험 장치 설계 및 테스트

파이프의 위치를 임의로 변화할 수 있는 환경을 위해 3자유도 기구부를 제작하였다. 3개의 관절을 갖는 R-R-R 타입의 로봇팔을 이용하여 [그림 5]와 같이 관절각을 변화하여 끝단의 파이프의 위치 및 각도 변화에 따른 좌표계 추출을 테스트하였다.

파이프 좌표계 추출의 경우, 샘플링에 의한 초기 매칭과 이후 정확도를 위한 전체 데이터에 대한 매칭의 2단계 방법론을 적용하였다. 바닥면과의 평면 매칭의 경우, RANSAC에 의해 추출된 바닥의 약 6천 여개의 질점과 매칭할 때 적용전과 적용후 약 34.7%의 시간 단축 효과를 보였다. 적은 수의 샘플을 통해 수렴 위치를 결정하고, 이후 전체 질점에 대해 매칭을 시도하기 때문에 ICP 탐색의 반복 연산이 줄어드는 효과가 있다.

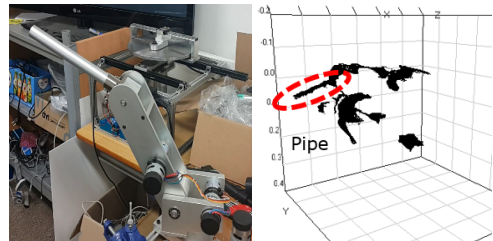


그림 5. 파이프의 동차변환을 조절하기 위한로봇팔(좌) 및 3D 스캐너 기반의 질점 추출 사례(우)

3자유도 로봇팔을 이용하여 피치 5도, 요우 20도를 대입한 형상을 스캐너 위치에서 환산하여 2단계 RANSAC에 의한 동차 행렬을 구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\begin{bmatrix} 0.940447 & -0.284602 & 0.185905 & -0.339823 \\ 0.329588 & 0.897311 & -0.293606 & -0.109784 \\ -0.0832536 & 0.337393 & 0.937675 & 0.938651 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이때 피치각을 구하면 약 4.7756도, 요우각은

19.7897도를 얻어 실제 로봇팔의 피치 5도, 요우 20도에 근사한 값을 얻을 수 있다. 이는 피치각은 약 4.4%, 요우각은 약 1%의 오차를 가짐을 알 수 있다.

끝단의 위치는 로봇팔로부터 구한 위치 벡터 (-0.342, -0.110, 0.940)와 유사한 (-0.339823, -0.109784, 0.938651)를 산출하였다. 위치 벡터의 경우, 약 0.6~1%의 오차를 보여 각도와 비교하여 상대적으로 우수한 결과를 보였다.

가장 큰 오차를 보인 피치각 산출의 주된 원인으로는 아래 [그림 6]과 같이 측정된 질점의 흔들림에 의한 것으로 판단된다. 사용된 파이프의 경우 알루미늄 소재를 사용하여 레이저의 반사율이 높아 표면의 질점 자체가 고르게 얻어지지 않았다. 반면 다수의 측정된 질점을 통해 매칭되는 과정에서 측정이 용이한 끝단의 위치는 오차가 적은 결과를 얻었다.

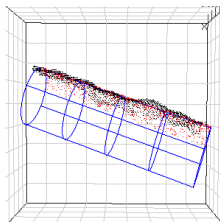


그림 6. 파이프 표면의 반사에 의한 질점 잡음 부분

파이프 위치의 정확도 판단 및 샘플링에 따른 속도 향상을 위해 파이프 위치의 세 가지 유형에 대한 평균 10회의 위치 추정 능력을 테스트하였다.

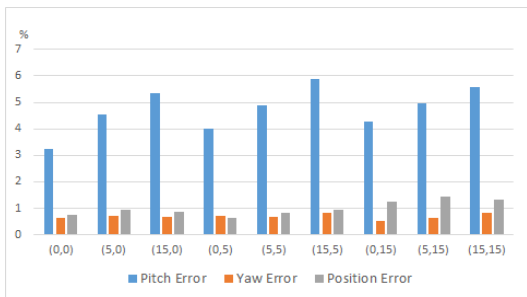


그림 7. 피치 및 요우각에 따른 평균오차율

테스트 장치를 이용하여 파이프의 피치 및 요우각을 변화하면서 10회 측정된 뒤, 파이프의 피치 및 요우각

을 산출하였다. 피치 및 요우각은 각각 0~15도 사이의 변화를 주고 이때의 각도 및 끝단의 위치에 대한 평균 오차를 퍼센트로 도출하였다. 해당 결과의 경우, 요우각과 위치 오차는 약 1%를 보이나 피치의 경우 각도 변화가 커질수록 최대 약 6%에 이르는 오차를 갖는 것을 알 수 있다.

최적화 수식의 경우, 11x11의 자코비안 역행렬을 풀기 위해, 수치해의 안정성이 높은 BLAS 라이브러리를 활용하였다[10]. 특히 수학적 연산의 안정성을 위해 포트란으로 구성된 BLAS 라이브러리를 이용하였다

일반적으로 많이 사용되는 인텔 매쓰 커널(Intel's Math Kernel)은 행렬 연산의 경우, 내부 코드가 C++ 기반의 BLAS로 작성되어 있어 연산 오류 감소를 위해 포트란 라이브러리를 활용하여 연산을 수행하였다.

일반적인 로봇팔의 역행렬 연산과 달리 기구적 구속 조건 특히 링크의 길이를 포함하는 경우, 관절각 변화량보다 링크의 변화량이 크기 때문에 수렴성 조절을 위해 파라미터를 적게 업데이트하는 것이 유리하다. 비선형 NR 방법의 경우, 업데이트물에 해당하는 α 를 1로 풀기도 하지만 비선형성이 높은 로봇팔의 구속 조건에서는 작은 값으로 0.0001을 사용하였다.

파이프 체결에 무의미한 롤 회전을 제외한 위치, 피치, 요우의 5개 구속 조건과 파이프 체결부의 총 길이를 최적화하기 위해 사용하고 있는 비선형 NR의 경우, 최대 500,000으로 진행되며 초기 파라미터 값에 따라 최소 70,000~400,000 내로 수렴하는 경향을 보여준다.

수렴된 결과의 경우, A지점에서 B지점에서의 좌표 변환에 따른 위치, 각도의 5개 구속조건에 정합성을 통해 평가 가능하다. 위치의 경우, 약 0.01% 미만의 작은 오차를 보이며, 피치와 요우의 경우 0.08%의 보다 큰 오차를 보였다.

최적화의 수렴성 문제보다는 링크부 각도에 대한 대응이 추가로 필요할 것으로 예상된다. 5개 구속조건을 만족하는 3 자유도 로봇팔의 형상 중 추가 고려가 필요한 부분은 q2, q3 관절각이다. 실제 파이프 체결부 설계에서는 q2, q3의 두 번의 구부림이 필요하기 때문이며, q1 각도는 파이프 체결시의 각도 회전에 사용된다.

q2, q3의 큰 회전은, 실제 금속 파이프를 휘어내기 불가능할 수 있어, 부등제한 구속조건 도입이 필요할

것으로 생각된다. 90도 이상의 구부림은 파이프의 내구성 및 수두 저하가 예상되어, 대형 파이프의 구부림을 위한 실 공정 기반의 부등제한 조건을 실험적으로 확인 및 최적화 수식에 도입하는 것이 필요하다.

VI. 결론

본 논문에서는 선박 건조시의 현장에서 파이프 간 어긋남에 대한 체결부의 맞춤형 설계방안을 제시하였다. 양 파이프간의 상대 위치를 측정하기 위해 RGBD 센서를 이용하고 3차원 직점과 원형 파이프 모델을 매칭하여 파이프 좌표계를 도출하는 방법론을 적용하였다.

RANSAC을 이용한 추출의 경우, 2단계 추출방식을 적용하여 국부적 수렴에 대한 대응을 통해 빠른 위치 판단과 정확성에 대한 테스트를 진행하였다. 파이프의 크기와 반경이 커짐에 따라 위치 정확도에 대한 부담이 증가할 가능성이 있어 향후 연구에서는 넓은 공간에서의 정렬에 대한 부분이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

양 파이프 좌표계를 연결하는 파이프 체결부 설계 파라미터 도출을 위해, 기구적 구속조건에 따른 최적화 수식을 유도하였다. 실제 파이프 체결부 설계에 필요한 파이프 구부림 각과 길이를 최적화 방법으로 도출하는 것이 가능하였다. 향후 파이프 성형의 가능각도 및 구부림의 중심 거리, 정확도에 대한 추가 연구를 통해 최적화 수식의 보완이 필요할 것으로 예상된다.

이러한 파이프 체결부의 설계 방법론은, 차후 현장 적용을 통한 검증 및 보완을 거쳐 선박 건조의 새로운 기술군으로 성장할 것이 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 장용구, 최현상, 이승원, 전홍수, 정미나, 오창균, 3차원 위치인식 및 무선통신 통합기술을 활용한 친환경 지하구조물 건설현장지원시스템 개발, 건설교통기술 촉진사업 보고서, pp.73-99, 2015.

[2] 유창, 안병진, 송승근, "증강현실을 이용한 펜스 디자인 개발 : 중국길림대학교 지질공 토목건설 현장 사례," 한국콘텐츠학회, 제13권, 제10호, pp.82-91, 2013.

[3] M. Olbrich, H. Wuest, P. Riess, and U. Bockholt, "Augmented reality pipe layout planning in the shipbuilding industry," 10th IEEE Int'l Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.26-29, 2011.

[4] O. Kermorgant, "A magnetic climbing robot to perform autonomous welding in the shipbuilding industry," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, pp.1-12, 2018.

[5] Y. He, B. Liang, J. Yang, S. Li, and J. He, "An Iterative Closest Points Algorithm for Registration of 3D Laser Scanner Point Clouds with Geometric Features," Sensors, Vol.17, pp.1862-1877, 2017.

[6] D. Geromino, A. D. Sappa, A. Lopez, and D. Ponsa, "Invariant Feature Point based ICP with the RANSAC for 3D Registration," Information Technology Journal, Vol.10, pp.276-284, 2010.

[7] J. Craig, *Introduction to Robotics*, 3rd Ed. Addison-Wesley, pp.19-32, 2005.

[8] M. Neagoe, N. R. Cretescu, and R. Saulescu, "Dynamic Modelling of a 3DOF Medical Parallel Robot with One Decoupled Motion," Advanced Materials Research, No.837, pp.594-599, 2013.

[9] A. Goldenberg, B. Benhabib, and R. Fenton, "A complete generalized solution to the inverse kinematics of robots," IEEE Journal on Robotics and Automation, Vol.1, pp.14-20, 1985.

[10] 양정연, "3차원 로봇 시뮬레이션 환경을 위한 웹 기반의 사용자 스크립트 연동 시스템 개발," 한국콘텐츠학회, 제19권, 제2호, pp.469-476, 2019.

저 자 소 개

양 정 연(Jeong-Yean Yang)

정회원



- 2000년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 AI로봇융합학과 교수

<관심분야> : 지능 로봇