

가상 링크 모델의 역기구학과 조작성을 이용한

능동 카메라 시스템의 최적 위치 결정에 관한 연구

Determination of Optimal Position of an Active Camera System Using

Inverse Kinematics of Virtual Link Model and Manipulability Measure

추길환*, 조재수**, 정명진***

(Gil Whoan Chu, Jae-Soo Cho, and Myung Jin Chung)

* 전주국제대학교 전자통신공학과 (전화: (055)751-8196, 팩스: (055)751-8195, E-mail: gilwhoanchu@hanmail.net)

** 한국기술교육대학교 인터넷미디어공학부 (전화: (041)560-1491, 팩스: (041)564-3261, E-mail: jaesoo27@kut.ac.kr)

*** 한국과학기술원 전자전산학과 (전화: (042)869-3429, 팩스: (042)869-3410, E-mail: mjchung@ee.kaist.ac.kr)

Abstract: In this paper, we propose how to determine the optimal camera position using inverse kinematics of virtual link model and manipulability measure. We model the variable distance and viewing direction between a target object and a camera position as a virtual link. And, by using inverse kinematics of virtual link model, we find out regions that satisfy the direction and distance constraints for the observation of target object. The solution of inverse kinematics of virtual link model simultaneously satisfies camera accessibility as well as a direction and distance constraints. And, we use a manipulability measure of a active camera system in order to determine an optimal camera position among the multiple solutions of inverse kinematics. By using the inverse kinematics of virtual link model and manipulability measure, the optimal camera position in order to observe a target object can be determined easily and rapidly.

Keywords: active camera, virtual link, inverse kinematics, manipulability measure

1. 서론

조립이나 용접과 같이 자동화된 작업에서 작업 공정의 진행 상황과 작업물의 상태를 확인하거나 원격 수술이나 원격 작업을 수행할 때 원격지에서 작업장의 상황이나 작업 과정을 파악하기 위해서는 영상 정보를 효율적으로 획득할 수 있는 모니터링 시스템이 필요하다. 대상물의 영상 정보를 획득하기 위한 카메라 시스템은 작업의 종류와 작업 환경의 특성에 따라 다양한 형태와 구조로 개발되어 왔으며, 작업 환경이 복잡하거나 대상물이 움직이는 경우에도 대상물의 영상 정보를 원활하게 획득할 수 있도록 카메라의 위치를 변경하는 능동 카메라의 위치 제어에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. [1][2][3]

능동 카메라를 제어하는 방법 중에서 CAD 모델과 같이 대상물과 작업장의 기하학적 모델과 작업 공정으로부터 대상물과 카메라의 위치 정보를 추출하고, 원하는 영상을 획득하기 위한 여러 가지 제한 조건을 만족하는 카메라의 위치를 결정하고 제어하는 방법을 센서 계획법(sensor planning)이라고 한다. K. Tarabanis, R. Y. Tsai, S. Abrams 은 대상물의 영상 정보를 획득하기 위한 카메라의 위치에 대한 제한 조건을 해상도(resolution), 시야(field-of-view), 초점(focus), 가시성(visibility)의 4 가지로 제시하고, 4 가지 제한 조건을 모두 만족하는 영역에 카메라를 위치시키는 방법을 제안하였다.[4] C. K.

Cowan, A. Bergman 과 S. Yi, R. M. Haralick, L.G. Shapiro 는 각각 조명이 영상에 미치는 영향을 고려하여 대상물을 관찰하기 위한 카메라와 조명의 위치를 결정하는 방법을 제시하였다.[5][6] Nelson 과 P. K. Khosla 는 대상물이 카메라의 영상에 투영되는 정도를 resolvability 로 표현하고, resolvability 가 가장 큰 곳에 카메라를 위치시키도록 하였다.[7]

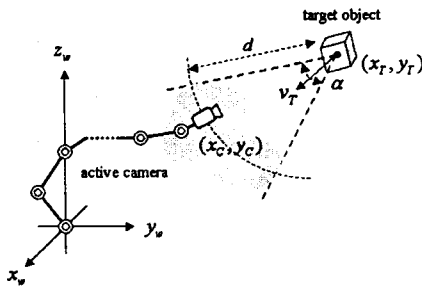
이와 같이, 센서 계획법은 대상물이나 주변 환경에 대한 기하학적 모델링이 가능하고 대상물의 위치와 움직임이 결정되어 있는 경우 영상 정보를 획득할 수 있는 매우 유용한 방법이다. 하지만, 영상 정보를 획득하기 위한 여러 가지 제한 조건을 동시에 만족하는 3 차원 영역을 구하는데 많은 계산 시간이 요구되며, 이렇게 획득한 3 차원 영역 중에서 어느 곳이 최적의 카메라 위치인지 결정해야 한다. 뿐만 아니라, 제한 조건을 만족하는 3 차원 영역과 카메라의 최적 위치는 대상물의 위치 변화에 영향을 받기 때문에 대상물이 움직이는 경우에는 제한 조건을 만족하는 3 차원 영역과 카메라의 최적 위치를 다시 구하고, 카메라의 위치를 변경해 주어야 하므로 동적인 환경에 적용하기 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 가상 링크(virtual link)라는 개념을 제안하고, 가상 링크를 포함한 능동 카메라 시스템의 역기구학을 이용하여 대상물의 영상 정보를 획득할 수 있는 3 차원 영역을 획득하는 방법과, 능동 카메라

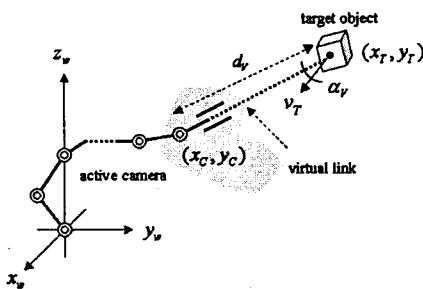
라 시스템의 조작성(manipulability)을 이용하여 3 차원 영역 중에서 최적의 카메라 위치를 결정하는 방법을 제안한다. 가상 링크 모델의 역기구학과 시스템의 조작성을 동시에 고려하여 카메라의 최적 위치를 결정하도록 함으로써 대상물이 움직이는 동적인 환경에도 신속하게 카메라의 위치를 변경할 수 있도록 한다.

II. 가상 링크를 이용한 능동 카메라 모델링

대상물의 영상 정보를 획득하기 위한 카메라의 위치는 대상물이 카메라 영상에 투영되는 형태와 대상물과 카메라의 상대적인 위치에 대한 제한 조건에 의하여 결정된다. K. Tarabanis 가 제안한 바와 같이 대상물의 영상 정보를 획득하기 위해서는 해상도, 시야, 초점, 가시성에 대한 제한 조건을 모두 만족하여야 한다. 이러한 제한 조건들은 대상물을 기준으로 대상물을 바라보는 카메라의 '방향'에 관한 제한 조건과 '거리'에 관한 제한 조건으로 구분할 수 있다. 즉, 해상도와 초점에 관한 제한 조건은 대상물과 카메라의 거리에 대한 영역을 제한하며, 시야와 가시성은 대상물을 바라보는 카메라의 방향을 제한한다. 그러므로, 대상물의 영상 정보를 획득하기 위해서는 방향과 거리에 대한 제한 조건을 동시에 만족하는 영역에 카메라를 위치시켜야 한다.



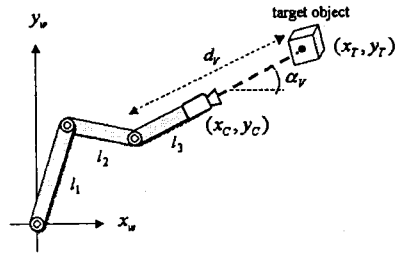
(a) 카메라의 위치에 관한 거리와 방향 제한 조건
(a) Constraints of distance and direction of camera position



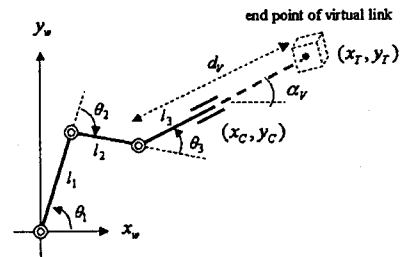
(b) 가상 링크 모델
(b) Virtual link model

그림 1. 능동 카메라 시스템과 가상 링크
Fig. 1. Active camera system and virtual link

그림 1 은 대상물을 관찰하기 위한 방향과 거리에 관한 제한 조건을 가상 링크로 모델링 하는 모습을 나타낸다. 그림 1-(a)와 같이 대상물의 표면에 대한 수직 벡터, v_r , 에 대하여 카메라의 시선 방향에 관한 제한 조건이 $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$ 이고, 거리에 대한 제한이 $d_{min} \leq d \leq d_{max}$ 이면, 카메라는 방향과 거리 조건을 모두 만족하는 영역 내에 위치하여야 한다. 대상물을 바라보는 카메라의 시선 방향과 거리를 각각 α_v , d_v 라고 하면, 그림 1-(b)와 같이 대상물과 카메라와의 위치 관계는 길이가 d_v 인 prismatic 타입의 링크이며 링크의 끝점에 대한 방향이 α_v 인 가상 링크로 모델링 할 수 있다. 이와 같이, 대상물과 카메라의 위치에 관한 기하학적 관계를 가상 링크로 모델링하면 대상물을 관찰하기 위한 거리와 방향에 관한 제한 조건은 각각 가상 링크의 길이에 대한 제한 조건과 가상 링크가 가리키는 방향에 대한 제한 조건으로 대응된다. 뿐만 아니라, 방향과 거리 조건을 만족하는 영역을 구하는 것은 가상 링크를 포함하는 능동 카메라 시스템의 역기구학의 해를 구하는 것으로 대응된다.



(a) 3 자유도 능동 카메라 시스템
(a) Active camera system with 3-DOF



(b) 대상물의 위치와 가상 링크
(b) Position of target object and virtual link

그림 2. 가상 링크를 이용한 능동 카메라 모델링
Fig. 2. Modeling of active camera using virtual link

그림 2 는 3 축의 여유 자유도를 갖는 능동 카메라 시스템을 가상 링크를 이용하여 모델링 한 것이다. 링

크의 길이가 각각 l_1, l_2, l_3 이고 카메라와 대상물의 위치가 각각 $(x_C, y_C), (x_T, y_T)$ 일 때, 가상 링크를 이용한 능동 카메라의 기구학적 모델은 수식 (1) ~ (3) 으로 표현된다. 여기에서 S_1, C_1 와 S_{12}, C_{12} 는 각각 $\sin(\theta_1), \cos(\theta_2), \sin(\theta_1 + \theta_2), \cos(\theta_1 + \theta_2)$ 를 의미한다.

$$x_T = l_1 C_1 + l_2 C_{12} + l_3' C_{123} \quad (1)$$

$$y_T = l_1 S_1 + l_2 S_{12} + l_3' S_{123} \quad (2)$$

$$\alpha_V = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3(2)$$

$$l_3' = l_3 + d_V \quad (3)$$

카메라의 방향과 거리에 대한 제한 조건은 수식 (4) ~ (5)와 같이 가상 링크의 방향과 길이에 대한 제한 조건으로 표현된다.

$$\alpha_{\min} \leq \alpha_V \leq \alpha_{\max} \quad (4)$$

$$d_{\min} \leq d_V \leq d_{\max} \quad (5)$$

III. 카메라의 최적 위치 결정

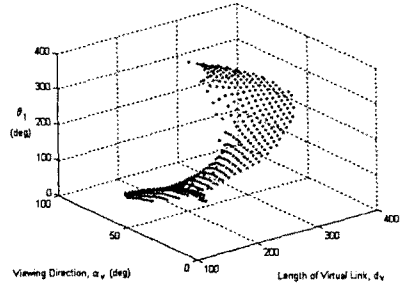
대상물의 영상 정보를 효율적으로 획득하기 위해서는 카메라와 대상물의 위치에 대한 방향과 거리 조건을 만족하는 3 차원 영역 중에서 대상물을 가장 잘 관찰할 수 있는 카메라 위치를 결정하여야 한다. 최적의 카메라 위치를 결정하고 신속하게 카메라를 제어하기 위하여 본 연구에서는 가상 링크를 포함한 능동 카메라 시스템의 역기구학과 카메라의 조작성을 이용하는 방법을 제안한다.

1. 가상 링크 모델의 역기구학

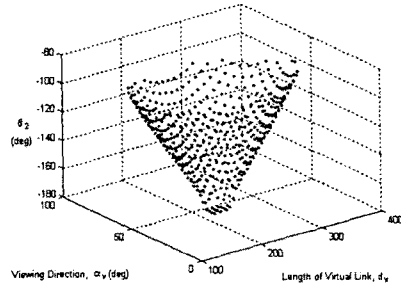
방향과 거리 조건을 동시에 만족하는 3 차원 영역의 모든 곳에 능동 카메라를 위치시킬 수 있는 것은 아니다. 방향과 거리 조건을 만족한다고 하더라도 능동 카메라의 링크 길이나 자유도와 같은 카메라 시스템의 기구학적 제한에 의해서 카메라를 위치시킬 수 없는 영역이 존재하게 된다. 그러므로, 방향과 거리 조건을 만족하는 3 차원 영역 중에서 카메라를 위치시킬 수 있는 영역을 구해야 한다. 방향과 거리 조건을 만족하면서 카메라를 위치시킬 수 있는 영역은 가상 링크를 포함한 능동 카메라 시스템의 역기구학을 이용함으로써 쉽게 구할 수 있다. 즉, 카메라의 방향과 거리에 대한 제한 조건이 가상 링크에 대한 기구학적 모델로 표현되므로, 가상 링크를 포함한 역기구학의 해가 존재하는 영역은 방향과 거리에 대한 제한 조건을 만족함과 동시에 기구학적으로 카메라를 위치시킬 수 있는 영역이 되는 것이다.

그림 3 은 그림 2 에서 능동 카메라 시스템의 링크 길이가 각각 $l_1 = 100, l_2 = 80, l_3 = 50$ 이며 대상물의 위치가 $(x_T, y_T) = (200, 200)$ 인 경우에 대하여 가상

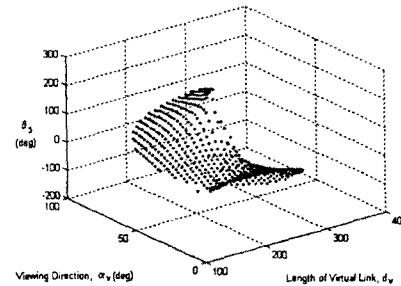
링크로 모델링하고 역기구학의 해를 구한 것이다. 대상물의 표면에 대한 수직 벡터는 $v_T = -45^\circ$ 로 설정하였으며, 방향에 대한 제한 조건은 $-45^\circ \leq \alpha_V \leq 45^\circ$, 거리에 대한 제한 조건은 $100 \leq d_V \leq 400$ 으로 설정하였다. 결과에 나타난 바와 같이 역기구학은 다수의 해를 가지며, 이것은 방향과 거리 조건을 만족하면서 카메라를 위치시킬 수 있는 3 차원 영역을 의미한다.



(a) 첫번째 링크의 자세, θ_1
(a) Configuration of first link, θ_1



(b) 두번째 링크의 자세, θ_2
(b) Configuration of second link, θ_2



(c) 세번째 링크의 자세, θ_3
(c) Configuration of third link, θ_3

그림 3. 가상 링크 모델을 이용한 역기구학의 해
Fig. 3. Solution of inverse kinematics using virtual link model

2. 능동 카메라 시스템의 조작성

그림 3에 나타난 바와 같이 카메라의 방향과 거리에 대한 제한 조건이 상수로 결정되지 않거나 능동 카메라가 여유 자유도를 갖는 경우에는 능동 카메라 시스템의 역기구학은 다중 해를 갖게 된다. 역기구학이 다중 해를 가질 경우에는 다중 해로부터 최적의 카메라 위치를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 역기구학의 다중 해로부터 카메라의 최적 위치를 결정하기 위하여 능동 카메라 시스템의 조작성을 고려하였다. 조작성이란 머니플레이터의 자세에 대한 동작 능력을 나타내는 척도이다. 머니플레이터는 자세에 따라 제어할 수 있는 방향과 속도에 차이가 발생하며, 머니플레이터가 특이점(singular point)에 놓이거나 특이 자세를 취하는 경우에는 특정 방향으로의 운동성에 제한을 받게 된다. 카메라가 특이점에 위치하면 대상물의 움직임에 대응하여 신속하게 위치를 변경하기 어렵게 된다. 그러므로, 카메라가 특이점에 놓이는 것을 방지하고 대상물의 움직임에 신속하게 대응할 수 있도록 하기 위하여 능동 카메라의 조작성이 가장 좋은 곳을 최적의 위치로 결정하였다.

$$w = \sqrt{\det \mathbf{J}(\mathbf{q}) \mathbf{J}^T(\mathbf{q})} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} - l_3 S_{123} & -l_2 S_{12} - l_3 S_{123} & -l_3 S_{123} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} + l_3 C_{123} & l_2 C_{12} + l_3 C_{123} & l_3 C_{123} \end{bmatrix} \quad (7)$$

머니플레이터의 조작성은 수식 (6)으로 정의되며, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 는 Jacobian Matrix를 나타낸다.[8] 수식 (1)~(3)을 이용하여 그림 2의 능동 카메라에 대한 Jacobian Matrix를 구하면 수식 (7)로 표현된다. 수식 (7)을 이용하여 능동 카메라 시스템의 역기구학의 다중 해에 대한 조작성을 구하면 그림 4의 결과를 얻는다.

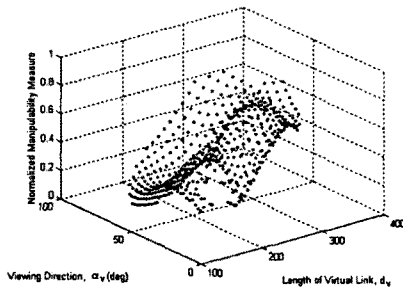


그림 4. 3-링크 능동 카메라 시스템의 조작성
Fig. 4. Manipulability measure of 3-link active camera system

그림 4의 결과에서 조작성이 최대가 되는 카메라의 위치는 $(x_c, y_c) = (26.8, 100.0)$ 이며, 이때 대상물을 바라보는 카메라의 방향과 거리는 $\alpha_v = 30^\circ$, $d_v = 200$ 이다. 조작성이 최대가 되는 위치에 카메라를 위치시

키기 위한 능동 카메라의 링크에 대한 자세는 각각 $\theta_1 = 154.2^\circ$, $\theta_2 = -131.0^\circ$, $\theta_3 = 6.8^\circ$ 이다.

이상과 같이, 대상물의 영상 정보를 획득하기 위한 방향과 거리 조건을 만족하는 3 차원 영역 중에서 카메라의 조작성이 가장 좋은 곳을 최적의 카메라 위치로 결정할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 대상물의 영상 정보를 획득하기 위한 카메라의 위치를 결정함에 있어서, 대상물과 카메라의 위치에 관한 기하학적 관계를 가변 길이를 갖는 가상 링크로 모델링하고 가상 링크를 포함한 능동 카메라 모델의 역기구학과 시스템의 조작성을 이용하여 최적의 카메라 위치를 결정하는 방법을 제안하였다. 가상 링크 모델의 역기구학을 이용함으로써 대상물을 관찰하기 위한 방향과 거리 조건을 만족하며 카메라를 위치시킬 수 있는 3 차원 영역을 쉽게 구할 수 있음을 보였다. 또한, 능동 카메라의 조작성을 고려하여 제한 조건을 만족하는 영역 중에서 대상물의 움직임에 신속하게 대응할 수 있는 위치를 최적의 카메라 위치로 결정하는 방법을 제안하였다. 이와 같이, 가상 링크 모델의 역기구학과 시스템의 조작성을 동시에 고려함으로써 능동 카메라의 최적 위치를 신속하게 결정할 수 있으며, 대상물이 움직이는 동적 환경에도 신속하게 대응할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Triggs and C. Laugier, "Automatic camera placement for robot vision tasks", *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1732-1737, 1995.
- [2] J. A. Fayman, E. Rivlin, and H. I. Christensen, "A system for active vision driven robotics", *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1986-1992, 1996.
- [3] M. Mitsuishi, Y. Iizuka, H. Watanabe, H. Hashizume, and K. Fujiwara, "Remote operation of a micro-surgical system", *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1013-1019, 1998.
- [4] K. Tarabanis, R. Y. Tsai, and S. Abrams, "Planning viewpoints that simultaneously satisfy several feature detectability constraints for robot vision", *Proc. Int. Conf. Advanced Robotics*, 1991.
- [5] C. K. Cowan and A. Bergman, "Determining the camera and light source location for a visual task", *IEEE Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 509-514, 1989.
- [6] S. Yi, R. M. Haralick, and L. G. Shapiro, "Optimal sensor and light source positioning for machine vision", *Int. Journal of Computer Vision and Image Understanding*, vol. 61, no. 1, pp. 122-137, 1995.
- [7] Nelson and P. K. Khosla, "The resolvability ellipsoid for sensor based manipulation", Technical Report CMU-RI-TR-93-28, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1993.
- [8] T. Yoshikawa, *Foundations of Robotics: Analysis and Control*, MIT Press, 1990.