

논 잡초 방제용 자율주행 로봇을 위한 벼의 형태학적 특징 기반의 주행기준선 추출

Guidance Line Extraction for Autonomous Weeding robot based-on Rice Morphology Characteristic in Wet Paddy

최 근 하¹, 한 상 권¹, 한 상 훈¹, 박 광 호², 김 경 수¹, 김 수 현[†]

Keun Ha Choi¹, Sang Kwon Han¹, Sang Hoon Han¹, Kwang-Ho Park²,
Kyung-Soo Kim¹, Soohyun Kim[†]

Abstract In this paper, we proposed a new algorithm of the guidance line extraction for autonomous weeding robot based on infrared vision sensor in wet paddy. It is the critical process for guidance line extraction which finds the central point or area of rice row. In order to improve accuracy of the guidance line, we are trying to use the morphological characteristics of rice that the direction of rice leaves have convergence to central area of rice row. Using Hough transform, we were represented the curved leaves as a combination of segmented straight lines on binary image that has been skeletonized and segmented object. A slope of the guidance line was gotten as calculate the average slope of all segmented lines. An initial point of the guidance line was determined that is the maximum pixel value of the accumulated white columns of a binary image which is rotated the slope of guidance line in the opposite direction. We also have verified an accuracy of the proposed algorithm by experiments in the real wet paddy.

Keywords: Autonomous Weeding Robot, Guidance Line Extraction, Robot Vision, Rice Morphology

1. 서 론

최근 친환경 농업에 대한 관심 증가와 농촌사회에서 대두되고 있는 고령화에 따른 일손부족, 생산성 감소 등이 심각한 사회문제로 대두되면서 고된 농작업을 대신 수행하는 무인로봇의 필요성이 부각되고 있다. 특히 다양한 농작업 중 잡초방제는 작물의 생산성을 좌우하는 중요한 작업인 반면 기계화율이 낮아 로봇을 이용한 방제작업이 더욱 요구되는 분야이다. 이런 잡초방제용 로봇의 경우 인간

을 대신하여 자율적으로 작업을 할 수 있는 자율주행 기술이 필수적이며 최근 많은 연구들이 진행되고 있다. 대부분의 연구들은 비전센서(vision sensor)를 이용한 객체인식(object perception) 기반의 방법들을 많이 적용하고 있다. 잡초방제로봇의 비전센서 기반 자율주행은 작물열 인식(crop row perception), 주행기준선(guidance line) 추출, 로봇의 작물열 추종(robot motion control) 단계로 크게 구분할 수 있다. 그 중 주행기준선 추출은 인식된 작물열 영상에서 로봇이 추종해야 하는 기준선을 추출하는 단계로 작물의 손상 없이 로봇이 안전하고 정확하게 작업을 수행하게 하는 중요한 과정이다.^[1]

주행기준선 추출을 위한 기존연구는 크게 영상의 픽셀 값(pixel value) 분포를 이용한 방법과 허프변환(Hough transform)을 이용한 방법으로 구분할 수 있다. Olsen[2]의

Received : Jul. 15. 2014; Reviewed : Jul. 30. 2014; Accepted : Aug. 08. 2014
* This research was supported by Advanced Production Technology Development Program, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs
1 Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (choiha99@kaist.ac.kr, sangkwon726@kaist.ac.kr, han30230@kaist.ac.kr, kyungsookim@kaist.ac.kr)
2 Department of Food Crops, Korea National College of Agriculture and Fisheries (kh5008@korea.kr)

경우 영상 픽셀의 회색조 값(gray value)을 수직 축 방향으로 영역단위로 합하여 회색조 값의 합이 가장 큰 곳에 주행기준선이 결정되도록 하였다. Pla^[3]는 회색조 영상을 골격화 영상으로 변환하여 골격화 선의 최대 교차 소실점을 찾아 작물열에서 주행기준선을 추출하였다. Slaughter^[4]는 작물 열의 수직 방향으로 분할된 영역에서 그레이 값이 축척된 공간적 분포(spatial distribution)의 중앙값에 해당하는 열을 주행기준선으로 결정하는 접근법을 제안하였다. Søgaard^[5]는 영상을 수평방향 영역으로 분할하여 수평 띠(strips)를 획득한 후 각 수평 띠를 하나의 띠로 합하여 회색조 값의 누적 합을 구한 후 원형 띠로 다시 표현하여 무게중심(CoG) 결정을 통해 열의 위치로 투영시키는 방법을 사용하였다. Hana^[6]는 작물열의 이진영상(binary image)에서 중심점(centroid point)과 방향각(orientation angle)을 계산하여 주행기준선을 표현하였다. 이런 방법들은 로봇 자세 변화에 따른 영상의 회전이 있을 경우 인식된 작물열의 회색조 값은 수직형태의 분포가 아닌 기울기를 가진 분포형태를 가지므로 픽셀 값 분포의 최대값을 구하고자 할 때 오차가 발생한다는 단점이 있다. 또한 앞이 가는 작물의 경우 그레이 값 분포의 최대값이 항상 작물의 중앙에 놓이지 않을 경우가 있어 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

다음으로 허프변환을 이용한 연구로서 Marchant^[7]는 인식된 근적외선 이진영상에서 허프변환을 이용하여 주행기준선을 추출하였다. Rovira-Más^[8]는 허프변환의 효율성을 높이기 위해 작물열 영상의 중앙점을 연결한 골격화 선을 허프변환에 적용하여 기준선을 획득하였고, Bakker^[9]는 작물열이 있는 공간을 사각 영역으로 분할한 후 각 영상을 하나로 융합하여 그레이 값의 밀도를 높인 후 허프변환을 실시하여 영상 처리시간을 단축하고자 했다. Ronghua Ji^[10] 역시 Randomized-허프변환을 통해 계산시간 증가 문제를 해결하고자 했다. 허프변환 역시 인식된 작물의 중앙점을 정확하게 인식하기 어렵다면 정확도가 떨어지는 문제가 여전히 존재한다.

기타 다른 방법으로 Billingsley^[11]는 정해진 영역(Window) 안에 인식된 작물을 하나의 점으로 가정하여 이 점들의 회귀선에서(regression line) 주행기준선을 추출하고자 했다. Romeo^[12]는 작물열 이진영상에서 최소제곱 선형회귀(least squares linear regression) 방법을 이용하였으며, 모든 픽셀의

하단 열에서부터 모든 가능한 라인을 추적(Trace)하여 추적된 직선 중에서 누적 녹색 픽셀수가 최대가 되는 직선을 주행기준선으로 결정하였다. 회귀선을 추출하는 방법은 매우 간단하게 적용할 수 있다는 장점이 있으나 주행기준선의 정확도가 특이치(outlier)에 민감하여 영상의 노이즈가 많을 때 정확도가 크게 떨어진다는 단점을 가진다.

결국 주행기준선의 정확도는 작물의 중심점 또는 영역을 얼마나 정확하게 추정하는가에 따라 결정된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 방법으로 정확도 높은 주행기준선을 추출하기 어려운 모열(Rice row)의 생태학적 특성을 이용한 새로운 주행기준선 추출방법을 제안하고자 한다. 물론 주행기준선은 노이즈가 적은 우수한 품질의 모열 영상에 따라서도 정확도에 영향을 받으나 본 연구에서는 이미 인식된 모열 영상에서 주행기준선의 정확도를 높이는 방향에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 모열의 중심영역 추출 정확도를 높이기 위해 모 앞이 중심방향으로 수렴하는 형태학적 특징을 이용하였으며, 이를 구현하기 위해 간단한 이미지 처리를 통해 알고리즘의 실시간성을 높였다. 2장에서는 알고리즘이 적용되는 논 잡초 방제용 로봇 시스템에 대해 소개하고, 3장에서는 주행기준선 추출 알고리즘, 4장에서는 실험 결과, 5장에서 결론 순으로 기술하였다.

2. 논 잡초방제 로봇 시스템

2.1 로봇 시스템 소개

로봇의 형상은 그림 1과 같이 스크루(screw) 형태의 전방향 조향(4-wheel steering) 전기 모터 구동부, 소형 엔진, Floater, 제어부 등으로 구성되어 있다. 이 로봇은 적외선 비전카메라를 통해 인식된 모열을 따라가며 스크루 형태의 바퀴를 이용하여 모열 사이의 주, 조간(inter-row, Intra-row) 잡초를 제거하고 진행하는 방식의 로봇이다. 이 로봇의 주요 특징은 전방향 조향 방식으로 모열간 상하좌우 이동이 용이하고 소형 엔진의 사용으로 전기 배터리에 비해 운용의 효율성을 높인 것이다. 또한 진흙 환경에서 로봇이 주행간 아래 방향으로 침하되는 문제를 방지하기 위해 Floater를 스크루 상부에 장착하여 부력 유지를 통해 침하현상을 방지하고자 하였다.

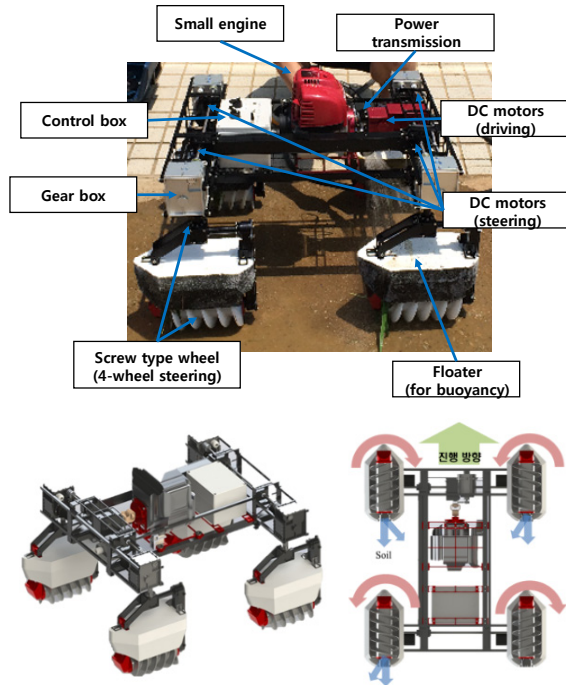


Fig. 1. Weeding robot system in wet paddy

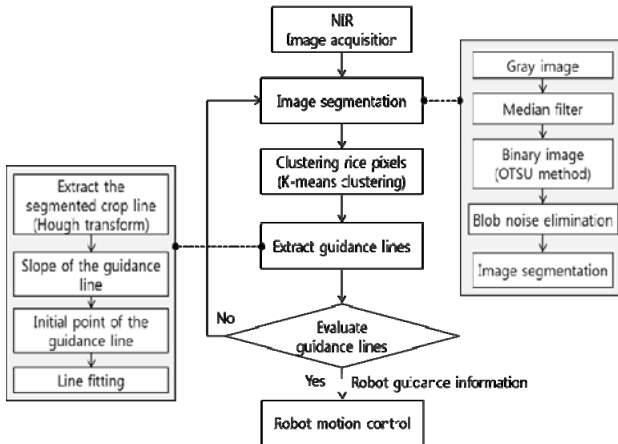


Fig 2. System architecture of an autonomous weeding robot

2.2 시스템 아키텍처(architecture)

잡초 방제로봇의 자율주행 시스템 아키텍처는 그림2와 같이 영상획득 및 분할(image acquisition and segmentation), 주행기준선 추출 및 평가(guidance line extraction and evaluation) 그리고 로봇 제어(robot motion control)로 나눌 수 있다.

3. 주행기준선 추출

3.1 영상획득(Image acquisition)

주행기준선 추출을 위해 영상은 근적외선(near infrared ray) 영상을 활용하였다. 근적외선 영상은 컬러 영상에 비하여 무논(wet paddy) 환경에서 모와 배경 사이의 분할에 유리하여 작물열 인식에 많이 활용되고 있는 방법이다. 이렇게 획득된 근적외선 영상은 그림3와 같이 그레이 스케일(grey scale) 영상으로 변환하고 문턱값 처리(thresholding)를 통해 배경으로부터 모열을 인식해내는 영상분할(image segmentation) 과정을 거쳐 이진영상 형태의 모열 영상을 획득하게 된다. 이 때 야외환경에서의 조명변화로 인한 영상 노이즈(image noise)의 영향성을 최소화하기 위해 2차 중앙값 필터(median filter)를 적용하였으며 대표적인 가변 문턱값 처리 방법 중에 하나인 Otsu method(Otsu, 1979)를 적용하여 이미지 분할(Image segmentation)을 실시하였다. 추가적으로 수면 위강한 빛에 의한 경면반사로 발생되는 작은 크기의 노이즈를 제거하기 위해 식(1)과 같은 이미지 프로세싱 과정을 수행하였다. 이 과정은 인식된 모열 영상 내 연결성(connective)이 떨어지는 작은 blob 형태의 노이즈 제거를 위해 인접한 픽셀의 점유면적($P_{(i,j)}^{area}$)이 임계치(ξ) 이하가 되면 해당 픽셀의 이진 값을 0으로 설정하여 제거되도록 하였다.

$$P = \{p_{(i,j)} \mid \text{all pixels of } P_{(i,j)}^{area}\} \quad (1)$$

$$\text{Blob noise elimination} = \begin{cases} P = 0, & \text{If } P_{(i,j)}^{area} < \xi \\ P = 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

, where $P_{(i,j)}^{area}$ = number of pixels in adjacent $p(i, j)$

이렇게 획득한 모열 영상의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 모의 앞은 가늘고 중앙 줄기를 중심으로 좌우측으로 길게 잎이 펼쳐져 있어 픽셀 값의 분포를 이용한 주행기준선 추출 방법을 적용하기 어려우며 허프변환을 통해 하나의 중심선을 획득하기가 제한된다는 특징을 가지고 있다.

3.2 주행기준선 추출 알고리즘

앞서 설명하였듯이 모열 영상($m \times n$ image)을 보면 각 모가 구분되어 y 축 방향으로 연속성 없이 배치되어 있고 잎

이 가는 곡선의 형태를 가지고 있어 허프변환을 이용하여 정확한 하나의 직선을 추출하기 어려운 특성을 가지고 있다. 따라서 이런 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 곡선형의 모열 영상을 허프변환을 통해 얻어진 분절된 직선(segmented line)형태로 표현하여 주행기준선을 추출하고자 하였다. 모열 영상의 형태적 특징을 살펴보면 그림 3에서 보는 바와 같이 곡선형태의 잎이 중앙 줄기 방향으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 벼가 외떡잎 식물로 생장점이 땅속에 있으면서 어미줄기와 똑같은 높이가 나와 포기가 점점 붙어가는 모습을 가지기 때문이다. 이 수렴성을 이용하여 모의 중앙 줄기부분을 기준으로 주행기준선을 식(2)와 같은 직선의 방정식 형태로 결정하고자 하였다. 먼저 주행기준선의 기울기를 계산하기 위해 인식된 이진 모열 영상을 골격화(skeletonization) 한 후 허프변환을 수행하였다. 골격화는 빠른 처리속도와 곡선의 연결성을 잘 나타낼 수 있는 Zahng-Suen(Zhang and Suen, 1984) 방법을 적용하였다. 이렇게 추출한 예지는 곡선의 형태를 가지고 있기 때문에 곡선형태의 잎은 분절된 직선들의 결합으로 표현할 수 있고, 모의 잎이 좌우대칭의 형태를 가지므로 분절된 각 직선의 기울기(α_k) 평균을 식(3)과 같이 구하여 모 중앙 줄기의 기울기(θ_t^{final})를 추정하고자 하였다. 여기서 모 잎의 일부 끝부분의 경우 불규칙적으로 지면방향으로 처지므로 주행기준선의 기울기 평균을 구하기 위한 대상을 식(3)과 같이 범위를 한정하였다.

$$y = \theta_t^{final} \cdot x + b, \quad x_{initial} = (x_t, 0) \quad (2)$$



[Grey image] [Binary image]
Fig. 3. Rice row perception from NIR image

$$\theta_t^{final} = \sum_{k=1}^p (\alpha_k / p), \quad \text{where } |\alpha_k| < \mu \quad (3)$$

$$x_t = \max[\sum_{i=1}^n (s_i)], \quad (4)$$

s_i = the sum of white pixels in the row

주행기준선의 시점(initial point, x_t)은 그림 4(a)과 같이 이진영상에서 수직방향으로 누적된 화이트 픽셀 값이 최대치를 가지는 열의 x 좌표를 시점으로 정하였다. 하지만 로봇자세의 흔들림이나 방향변경으로 인해 인식된 모열이 수직선의 형태가 아닌 기울기를 가진 형태를 가지게 되면 누적 값의 최대치가 되는 시점에 그림 4(b)와 같은 오차가 발생하게 된다. 따라서 오차보정을 위해 앞서 구한 주행기준선의 기울기 값을 활용하여 시점을 식(4)과 같이 재결정하였다. 그림 5에 보는 바와 같이 영상에서 기울어진 모열 영상을 계산된 주행기준선의 기울기(θ_t^{final})만큼 반대로 영상을 회전 시킨 후 누적 값이 최대치를 가지는 열의 시점을 구하였다. 이렇게 결정된 열의 시점은 다시 회전행렬을 통해 원본 영상의 시점으로 투영시키게 됨으로써 기울어진 영상의 시점 오차를 보정하고자 하였다. 이 알고리즘은 모와 같이 잎이 가는 작물열에서 주행기준선을 추출하거나 로봇 자세변화에 따른 주행기준선의 오차를 줄일 수 있는 장점을 보유한 알고리즘이라 할 수 있겠다.

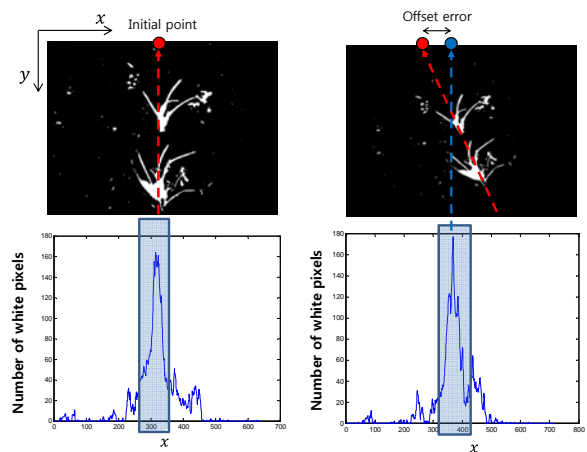


Fig. 4. Initial point of the guidance line

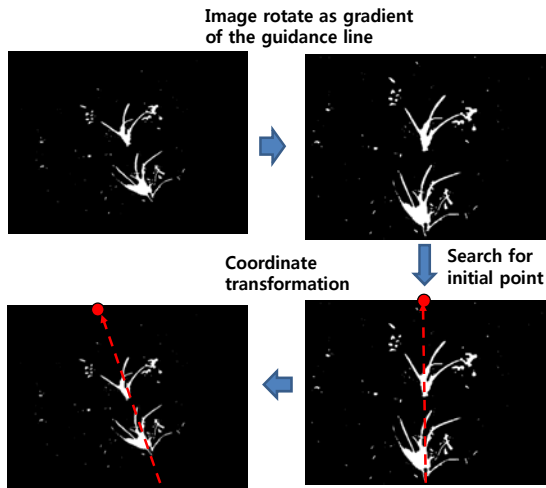


Fig. 5. Error correction of the initial point

4. 실험 결과

카메라는 Webcam(Logitech®)에 NIR Bandpass 필터를 장착하여 근적외선 영상(640×480)을 획득하였다. 실험은 한국농수산대학 온실내(PTC) 설치된 무논환경에서 실시되었으며 로봇은 약 0.1 m/s로 구동되도록 하였다.

그림 6은 모열 이진영상에서 분절된 직선을 추출한 영

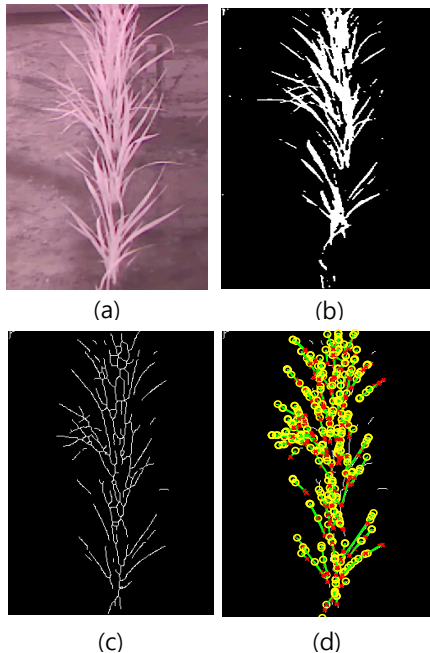


Fig. 6. Experiment results. (a) Original image, (b) Binary Image, (c) Skeletonized image, (d) Segmented lines (start point: circle, end point: cross, length: green)

상으로 분절된 직선들이 중앙줄기 방향으로 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 7(b), (c)의 파란색 직선은 추정된 주행기준선으로 빨간색 점선의 실제 모열과 큰 오차를 보이지 않는 것을 관찰할 수 있다. 표 1에서 보이듯이 모열이 인식된 총 102개의 영상 샘플을 대상으로 실제 모열과 주행기준선과의 RMS 각도오차는 0.67° 로 로봇의 주행오차를 고려할 때 정확하였다. 다만 이는 모열 영상이 분명할 경우이며 모열이 인식되지 않거나 영상의 노이즈가 많을 경우 오차가 증가될 수 있다. 따라서 특히 조명, 바람 등 환경적 영향에서도 모열 영상의 우수한 품질이 전제되어야 할 것으로 판단된다.

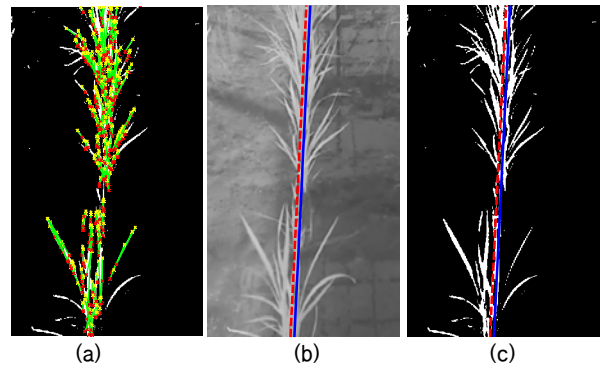


Fig. 7. Experiment results (a) segmented Hough line (b-c) guidance line; blue (crop line), red (guidance line)

Table 1. Offset error of the experiment results at PTC greenhouse

Samples	RMS	Max Error	Min Error
102 images	0.67 [°]	1.875 [°]	0.024 [°]

5. 결론

본 논문에서는 논 잡초방제용 자율로봇의 모열인식 기반의 주행기준선 추출을 위한 방법을 제안하였다. 인식된 모열 영상에서 모의 잎이 모의 중앙줄기 부분으로 수렴하는 형태학적 특징을 이용하기 위하여 골격화된 이진영상을 허프변환을 이용하여 분절된 직선으로 나타내었다. 이렇게 추출한 분절된 각 직선들의 기울기 평균을 계산하여 주행기준선의 기울기로 적용하였고 또한 모열 영상에서 각 열의 누적 화이트 픽셀 값의 최대지점을 시점으로 정하였다. 이 때 로봇자세에 의해 회전된 영상의 오차 보정을 위하여 계산된 주행기준선의 기울기 값만큼 영상을 회

전 시켜 시점을 재계산하여 오차를 보정하였다. 그리고 실험을 통해 제안한 알고리즘의 우수한 정확도를 검증하였다. 향후에는 바람, 조명 등 다양한 환경변화에도 강인한 알고리즘에 대한 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

References

- [1] Keun Ha Choi, Sang Kwon Han, Sang Hoon Han, Kwang-Ho Park, Kyung-Soo Kim, Soohyun Kim, "Guidance Line Extraction for Autonomous Guidance of Vision Sensor -based Weeding robot in Wet Paddy", Korean Robotics of Society Annual Conference, 2014
- [2] HLJ, Olsen, "Determination of row position in small-grain crops by analysis of video images," Computers and Electronics in Agriculture 12, pp.147-162, 1995
- [3] F. Pla, J.M. Sanchiza, J.A. Marchant, R. Brivot, "Building perspective models to guide a row crop navigation vehicle," Image and Vision Computing, vol 15, pp.465-473, 1997
- [4] D. C. SLAUGHTER, P. CHEN AND R. G. CURLEY, "Vision Guided Precision Cultivation," Precision Agriculture, vol 1, pp.199-216, 1999
- [5] H.T. Sogaard, H.J. Olsen, "Determination of crop rows by image analysis without segmentation," Computers and Electronics in Agriculture, vol 38, pp.141-158, 2003
- [6] S. Hana, Q. Zhang, B. Nic, J.F. Reid, "A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems," Computers and Electronics in Agriculture, vol 43, pp.179-195, 2004
- [7] J.A. Marchant, Renaud Brivot, "Real-time Tracking of Plant Rows Using a Hough Transform," Real-Time Imaging, vol 1, pp.363-371, 1995
- [8] F Rovira-Ma's, Q Zhang, J F Reid, and J D Will, "Hough-transform-based vision algorithm for crop row detection of an automated agricultural vehicle," Proc. IMechE, vol 219, pp.999-1010, 2005
- [9] Tijmen Bakker, Hendrik Wouters, Kees van Asselta, Jan Bontsemab, Lie Tangc, Joachim Mu" ller d, Gerrit van Stratena, "A vision based row detection system for sugar beet," Computers and Electronics in Agriculture, vol 60, pp.87-95, 2008
- [10] Ronghua Ji, Lijun Qi, "Crop-row detection algorithm based on Random Hough Transformation," Mathematical and Computer Modelling, vol 54, pp.1016-1020, 2011
- [11] J. Billingsley, M. Schoenfisch, "The successful development of a vision guidance system for agriculture," Computers and Electronics in Agriculture, vol 16, pp.147-163, 1997
- [12] J. Romeo, G. Pajares, M.Montalvo, J. M. Guerrero, M. Guijarro, and A. Ribeiro, "Crop Row Detection in Maize Fields Inspired on the Human Visual Perception," The Scientific World Journal, pp.10, 2012
- [13] Jeongdae Kim, Yongtae Do, "Human Detection in the Images of a Single Camera for a Corridor Navigation Robot," Journal of Korea Robotics Society, 8(4), pp.238-246, 2013
- [14] Heo Jung-Hun, Lee Min-Cheol, "Building Recognition using Image Segmentation and Color Features," Journal of Korea Robotics Society, 8(2), pp.082-091, 2013



최근하

2002 육군사관학교 무기공학과 (공학사)
2007 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
2007~2012 방위사업청
2012~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

관심분야: 로봇 자율주행, 비전 알고리즘 등



한상권

2013 한양대학교 기계공학부 (공학사)
2013~현재 한국과학기술원 로봇학제 석사과정
관심분야: 비전, 로봇보행 등



한상훈

2013 한양대학교 기계공학부 (공학사)
2013~현재 한국과학기술원 로봇학제 석사과정
관심분야: 생체모방로봇 등



박 광 호

- 1984 충북대학교 농과대학 농학과 (농학사)
- 1986 경북대학교 대학원 농학과 (농학석사)
- 1991 필리핀대학교 대학원 농학과 (농학박사)

1997~현재 국립 한국농수산대학 교수 (교수부장)
관심분야 : Mechatronics in Agronomy 등



김 수 현

- 1978 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1980 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1991 Imperial College of London (공학박사)

1991~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수
관심분야 : 생체모방로봇, 응용광학 등



김 경 수

- 1993 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
- 1995 동 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1999 동 대학원 기계공학과 (공학박사)

2007~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수
관심분야 : 강인제어, 액추에이터, 재활로봇 등