ICT 원격제어 system 이용 식물진단, Phenomics 연구현황 및 전망

정유진 · 노일섭 · 김용권 · 김희택 · 강권규

Current status and prospects of plant diagnosis and phenomics research by using ICT remote sensing system

Yu Jin Jung · Ill Sup Nou · Yong Kwon Kim · Hoy Taek Kim · Kwon Kyoo Kang

Received: 22 March 2016 / Revised: 22 March 2016 / Accepted: 23 March 2016
© Korean Society for Plant Biotechnology

Abstract Remote Sensing (RS) is a technique to obtain necessary information in a non-contact and non-destructive method by using various sensors on the surface, water or atmospheric phenomena. These techniques combine elements such as sensors, and platform and information communication technology (ICT) for mounting the sensor. ICT has contributed significantly to the success of smart agriculture through quantification and measurement of environmental factors and information such as weather, crop and soil management to distribution and consumption stage, as well as the production stage by the cloud computer. Remote sensing techniques, including non-destructive non-contact bioimaging (remote imaging) is required to measure the plant function. In addition, bioimaging study in plant science is performed at the gene, cellular and individual plant level. Recently, bioimaging technology is considered the latest phenomics that identifies the relationship between the genotype and environment for distinguishing phenotypes. In this review, trends in remote sensing in plants, plants diagnostics and response to environment

and status of plants phenomics research were presented.

Keywords Bioimaging, Information communication technology (ICT), Phenomics, Remote sensing

서론

Remote sensing은 각종 센서를 이용하여 지표면, 물, 대기 현상에 대해 비접촉, 비파괴적인 방법으로 필요한 정보를 얻어내는 기술로써 센서 등의 요소기술이 진보함에 따라 센서를 탑재한 정보통신기술(ICT) 등의 발달에 큰 힘을 얻고 있다. 특히 농업에 있어서 원격탐사는 작물, 토양, 물 및 기후를 포함하는 농경지 표면의 상태를 탐지하고 정량화함으로써 즉각적 또는 장기적인 농경지 관리, 나아가서는 정책결정을 위한 자료를 제공하는 역할을 하게 한다. 또한 이들 기술은 ICT기술을 접목하여 농/축산물 및 식품의 생산, 유통, 판매, 소비 전주기 프로세스에 대한 생산성, 안정성, 경제성 및 품질향상을 통해 각 단계의 활동 주체(생산 유통, 소비)들 간에 상생의 생태계구축을 위한 스마트농업에 큰 역할을 하고 있다(Kim 2010). 실제적 이용에서는 비파괴, 비접촉의 bioimaging (remote imaging)을 포함한 식물기능 remote sensing의 중요성이 인식되고 있다(Jones and Morison 2007; Furbank 2009). 또한 식물과학분야에서도 유전자, 세포단계부터 성장 개체에 이르기까지 Bioimaging 연구가 활발하게 진행되고 있다(Megan et al. 2011). 최근 식물의 표현형(phenotype) 분석은 식물기능 remote sensing 기술을 이용하여 유전자형과 환경 factor와의 연관성을 갖고 연구하고 있으며, 이들 기술을 식물육종 및 재배, 환경관리 분야에 접목한 식물 phenomics 연구가 세계적으로 주목 받고 있다(Furbank 2009; Robert

Y. J. Jung (✉) · K. K. Kang
환경대학교 원예생명과학과
(Department of Horticultural Life Science, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea, Institute of Genetic Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea)
e-mail: yuyu1216@hknu.ac.kr

I. S. Nou · H. T. Kim
순천대학교 원예학과
(Department of Horticulture, Sunchon National University, Sunchon, 57922, Korea)

Y. K. Kim
신경대학교 생명공학과
(Department of life Science & Biotechnology, Shingyeong University, Hwaseong, 445-741, Korea)

and Rebecca 2009). 본 논문에서는 식물기능 remote sensing의 기술동향, 식물진단 및 식물환경응답해석과 식물 phenomics 연구현황에 대해 고찰 하고자 한다,

식물기능 remote sensing의 기술적 동향

분자, 세포, 개체 및 지구관측까지를 대상으로 한 영상기술과 생명과학, 생물생산, 환경 등의 분야에 이용되는 각종 기술에 대한 흐름도를 Figure 1에 나타내었다. Remote sensing 기술은 식물 개체 수준에서 살펴볼 때 생체분자들인 DNA, RNA, 단백질, 효소 등의 활동이나 상호작용을 실시간으로 영상화하는 기술인 bioimaging과 육안이나 보통의 카메라로는 포착하기 어려운 현상을 항공기나 인공위성 등에 탑재한 감지기(sensor)를 이용해 공중이나 우주공간에서 광역적으로 포착하는 remote sensing으로 대별 할 수 있다. 계측된 영상정보는 실험실 또는 포장에서 정확하게 데이터화하여 검증하고, modeling 및 지리적 공간정보와 함께 기초과학분야 및 환경변화의 감시, 곡물의 수확예상 등의 응용 분야에 이용할 수 있다. 최근에는 인공위성과 같은 넓은 의미의 remote sensing 기술이 발달

함에 따라 고공간해상도, 고파장분해능, 3차원 영상화, 고빈도관측, 레이저 및 마이크로파 등의 능동적 센서 및 각종센서의 통합 활용이 가능해졌다(Ishimura et al. 2011). 식물기능을 계측하는 경우 인공위성과 같은 넓은 의미의 remote sensing에서는 공간해상도와 고빈도관측 면에서 문제점이 종종 발생되는데 이러한 문제점을 보완하고자 센서탑재 및 전지구적위성항법 system (GNSS) 수신기, IMU (관성계측장치), 무선통신 system의 탑재 등을 통해 다양한 식물기능 remote sensing (remote imaging) 기술이 개발되었다(Fig. 1). 식물기능 연구는 잎, 개체, 개체군 및 생태계에 존재하는 식물을 이용하여 remote sensing 기술과 유전자 스크리닝 및 해석 등의 기초과학 연구에 bioimaging 또는 molecular imaging 기술이 포함되어 있다(Omasa 2014). 최근 기후 변화에 적응하는 품종 개발을 목적으로 하는 식물 phenomics 연구 분야에서는 유전자 및 세포 수준에서 개체 수준까지의 다양한 식물 정보를 수량화하여 통계적으로 처리하고자 식물 기능 원격 탐사의 적극적인 도입이 도식화 되어 있다(Jones 2004; Furbank 2009; Omasa 2014). 또한 식물 공장과 토지 이용형 첨단 농업에서도 식물 진단 및 자동화를 위한 도입이 활발하다. 일반 컬러

Fig. 1 Flow diagram for bioimaging technique, biotechnology, biological production and environmental research (Omasa 2014)

카메라 수준부터 가시광선부터 근적외선을 대상으로 한 multi-band camera와 hyperspectral camera, 열 화상(온도) 측정을 위한 카메라, 수동적 또는 능동적 형광 측정 시스템, 3차원 계측을 위한 range rider 등 다양한 것이 시판 또는 연구용으로 개발되고 있다. 이러한 분야는 무선 통신이나 인터넷 등의 ICT 및 지리 정보 시스템(GIS), GNSS 등과 함께 시스템 개발뿐만 아니라 Big Data를 처리할 수 있는 Cloud Computing에 의한 서비스가 요구된다.

환경스트레스 반응해석과 식물 phenomics 연구

Omasa 등은 1970년대부터 식물기능과 환경 factor와의 관계 연구를 위하여 식물환경실험시설과 실험 포장의 식물 기능 remote sensing system에 관심을 갖고 식물의 열 적외선(온도) 이미지와 근자외~근적외 분광 반사 이미지를 광섬유 통신 등에 의해 온라인으로 자동 측정하고 분석하는 시스템을 최초로 구축하였다(Omasa et al. 1981; 1985; 1987; Omasa and Takayama 2003). 이들 시스템은 식물로부터 온도와 증발산, 오염 가스 흡수, 생장, 함유 색소 등의 식물 기능정보를 얻어 식물 환경 응답 분석 및 환경 저항성 또는 감수성 품종 선발, 식물 진단, 환경 영향 평가 등에 이용되어 왔다. 최근의 phenomics 연구는 작물의 생장

과 발육과정상에서 전략적이고 효율적인 선발이 필요하다. Kolukisaoglu와 Thurow (2010)는 식물생장촉진요인(영양) 및 생장저해요인(저해제, 환경스트레스)과 유전자의 상호작용을 밝히는 실험을 보고하였다(Fig. 2). 화학 유전체학 스크린방법 중 하나로 화학물질(예: 표백제)처리 시 특이적인 표현형을 보이는 식물체를 선발하거나, knock-out 돌연변이나 과발현 또는 GFP와 같은 리포터 유전자가 도입된 집단에서 특이적 표현형(표백된 개체)을 선발할 수 있는 방법과 몇몇 *Arabidopsis* ecotypes에서 D-아미노산에 저항성이 있는 개체들을 선발하고자 Biomek liquid handling robot을 이용하여 농도 별로 조절된 96-well plates에서 식물체를 선발하는 일이 가능하다고 보고하였다. 이런 결과로부터 실험실내에서 자동화장치 시설을 이용하면 대량집단선발을 효율적으로 수행할 수 있게 되었다. Berger et al. (2010)은 식물이 건조한 환경에서 시간이 경과됨에 따라 가뭄에 응답하며 나타나는 생리적 변화에 대한 정보 수집은 다른 가뭄 내성 매커니즘을 파악하고 특성화하기 위하여 매우 중요하다고 하였다, 식물의 매커니즘을 연구하기 위하여 Berger et al. (2010)은 밀의 생육 주기 동안 건조스트레스하에서 생육한 식물체가 정상적인 토양에서 생장한 것보다 엽면적이 월등히 작아지는 경향을 보였다고 보고하였다(Fig. 3). 이는 식물이 생장단계별로

Fig. 2 Schematic scenarios of chemical genetic screens. (A) A collection of chemical compounds is applied on a single line in order to find a particular phenotype (e.g. bleaching). (B) A single substance, which induces a particular phenotype (e.g. bleaching), is applied on a collection of genetically different lines to find insensitive lines. (C) A collection of chemical compounds is applied on genetically different lines to induce a particular phenotype (e.g. bleaching) with a particular compound in all of the tested lines (framed in red). (D) Resistance of different accessions of *Arabidopsis* seedlings to d-arginine (Kolukisaoglu and Thurow 2010)

Fig. 3 Physiological response for drought tolerance mechanism in crops. (A) Soil water availability during a wheat crop cycle at Roseworthy (South Australia) for the 2007 season. Each rectangle indicates at which time particular plant strategies could be useful to cope with water limitation. (B, C) Comparison of different barley (*Hordeum vulgare*) cultivars (Berger et al. 2010; Hartmann et al. 2011)

Fig. 4 Relationship between increasing salt concentrations, stomatal conductance and the change in leaf temperature on the second leaf of Himalaya barley seedlings grown in a range of salt treatments; (A) False-colour (iron bow palette), thermal infrared image of Himalaya barley at five levels of NaCl (0 to 200 mM); (B) Relationship between abaxial stomatal conductance and change in leaf temperature for the second leaf of Himalaya barley. (C) Increase in leaf temperature ($T_{150}TC$) of 17 durum wheat genotypes and Franklin barley due at 150mM NaCl. (Sirault et al. 2009)

Fig. 5 Detection technique for phenomenon difficult to evaluate with eyes such as a camera and microscope. (A) Cross-section of a soil column (3 cm diameter) showing roots of *Triticum aestivum* (L.) traced in 3-D using Rootviz; roots are shown in purple. (B) Root architecture of a 3-week-old *Zea mays* (L.) plant grown in a soil column. and extracted using Avizo software. Image courtesy of Mr Stefan Mairhofer. SVM (support vector machine) analysis identifies distinguishing traits in root systems. C and D, SVM comparison of Basmati 217 and Jefferson. E to F, SVM comparison of Lemont and Nipponbare. C and E, Images from eight individuals each of Basmati 217 and Jefferson (C) and Lemont and Nipponbare (E). D and F, Feature maps of root architecture (Tracy et al. 2010; Iyer-Pascuzzi et al. 2010)

Fig. 6 Phenopsis, an automated system for phenotyping *Arabidopsis thaliana* plants in response to soil water deficit (A, B). The automated system weighs, waters and takes a digital picture of individual plants. It is composed of a table and an arm which moves according to a program. A camera, a balance and a tube for irrigation are set up on this arm. (C–H) Digital pictures are taken automatically. (J) Spatial distribution of photosynthetic active radiation (PAR) in the phenopsis growth-chamber after correction of heterogeneity with neutral filters. The decrease in light intensity observed on the right of the chamber is caused by the arm of the robot (Granier et al. 2006).

수분 한계에 대처하기 위하여 전략을 갖고 생육을 하며, 대처방안으로 식물은 조기성숙이나 앞으로 닥칠 심각한 가뭄에 대비하여 빠른 회복을 유도하며 차선의 물 공급의 상태에서 신진대사와 발달을 위해 전략적으로 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 식물 phenomics 연구 중에 평가하기 어려운 형질을 계측하기 위해 Sirault et al. (2009)는 엽면온도를 기본으로 하여 기공전달도 및 엽해내성을 조사한 결과 두 형질간에 상관관계가 있음을 보고하였다(Fig. 4). 한편 식물 유전자형에 따른 엽해내성 정도에 따라 엽온이 올라간다고 하였다. 그러나 눈으로 평가하기 곤란한 형상을 계측하기 위해 카메라 및 현미경 등을 이용하여 Tracy et al. (2010)은 식물 뿌리의 형상을 NMR, x-ray CT 등에 의해 해석하여 특징화하였으며, Iyer-pascuzzi et al. (2010)은 투명배지에 식물체를 파종하여 뿌리의 생육상을 열감지 카메라에 의해 수치화하였다(Fig. 5). 실험실 수준에서 식물의 형상 조사를 위한 phenomics 연구는 Granier et al. (2006)에 의해 구체화되었다(Fig. 6). 이들은 수분 결핍 상태의 토양에 반응하는 애기장대의 표현형을 자동화시킨 phenosis 프로그램을 차트화 시켰다. Hartmann

et al. (2011)은 자동 온실 시스템에서 312 보리 계통을 포트에 심어 컨베이어 벨트를 이용하여 가시광선, 근 적외선 및 자외선 스펙트럼에서 생장 형상을 이미지화하는데 성공하였다(Fig. 7A). 또한 Montes et al. (2011)은 포장조건하에서 트랙터에 Laser curtain 및 SR 센서를 이용하여 식물이 생장상을 수치화하는 phenomic 기술을 개발하였다(Fig. 7B). Jones et al. (2009)은 tower 및 소형비행기에 각종 센서를 부착한 remote sensing 기술을 개발하여 작물의 생육상을 측정하여 보고하였다(Fig. 8). 최근 들어 유전체 및 대사체 연구분야에도 remote sensing 기술이 도입되어 활발한 연구가 진행되고 있다. Riedelsheimer et al. (2012)은 285 옥수수계통을 2 type으로 나누어 교배하고 일반조합능력(GCA)를 계측하여 수치화 하였으며, 계통들의 계통분석을 통해 56,110 SNPs 확보하고, 각 계통들로부터 얻어진 130개 대사물질을 각각 비교 검토하여 GCA 예측 정도를 발표하였다. SNPs를 이용한 GCA의 정확한 예측 순도는 72~81%로 나타났으며, 대사물질을 이용할 경우 GCA의 예측은 60~80% 이었다(Fig. 9). 따라서 계통정보 즉, SNPs 분석을 이용한 remote sensing 기술개발이

Fig. 7 Research facilities for phenomics studies in greenhouse and field condition. (A)View of the automatic greenhouse system. Image acquisition device for images in visible, near-infrared and ultra-violet spectra (a) greenhouse device consisting of a conveyor belt system carrying 312 barley plants (b), (B) Plant phenomic technology for plant growth digitization by using Laser curtain and SR sensors in tractor (Hartmann et al. 2011; Montes et al. 2011)

Fig. 8 Remote imaging technology corresponding thermal images in field condition. (A) Visible (RGB) digital image, together with some corresponding thermal images, of a rice ‘macro array’ trial in the dry season of 2006 consisting of 300 plots combining 50 contrasting genotypes, two water treatments (well watered and drought stressed). (B) A visible image of a grape vineyard (cv. Cabernet Sauvignon) at Oxford Landing, Waikerie, SA, taken from a balloon at a height of ~80m at 1240 hours on 9 January 2008, together with a corresponding thermal image also taken from the balloon at the same time. (C) The relationship between mean treatment temperatures obtained using an infrared thermometer mounted on a quad-bike and near-simultaneous data obtained from the balloon (Jones et al. 2009)

Fig. 9 Development of remote sensing techniques using genomic information (SNPs). (A) Genealogy of the population. The tree was reconstructed from SNP data with the balanced minimum evolution (BME) algorithm⁴⁷ on genetic distances. (B) Observed versus whole-genome-predicted GCA for dry matter yield. Results were averaged over all cross validation runs. Dividing the set of genotypes based solely on their SNPs would result in 203 (74.9%) correct classifications (blue), 36 (13.3%) false negatives (red) and 32 (11.8%) false positives (yellow) (Riedelsheimer et al. 2009)

가능할 것으로 생각한다.

식물기능 ICT 기반 플랫폼

식물기능 ICT 플랫폼은 Figure 10과 같이 유리온실에 부

착되어있는 온도, 습도, 전해질, 산도, 조도, 풍속 등을 체크하는 센서를 통해 수집되는 모든 데이터를 하나로 모으는 역할을 한다. 센서를 통해 수집되는 데이터는 기존의 도구로는 처리하기 어려운 수준의 대용량 데이터이기 때문에 분산시스템을 기반으로 데이터를 처리하는 Big

Fig. 10 ICT platform for plant phenomics analysis and smart agriculture in the greenhouse (Lee et al. 2014)

Data를 활용하여 데이터를 처리하게 된다(Lee et al. 2014). 센서를 통해 수집된 데이터는 단순히 한 시점의 환경 체크뿐만 아니라 수집된 Raw data를 분석하여 각 작물이 생육하는데 가장 좋은 환경을 갖출 수 있도록 하여 생산성의 증가 및 고품질의 작물을 수확할 수 있도록 할 수 있다. 식물기능 ICT 기반 플랫폼 구축을 통해 최적 생육환경을 위한 수집·분석된 데이터는 ICT 플랫폼으로 전송되어 농작물 재배기술에 대한 개방형 지식베이스를 구축하여 직접 플랫폼에 적용할 수 있는 ‘작물 별 생육환경 데이터베이스’를 제공할 수 있다. 따라서 국내 농업의 특성에 맞추어 모바일 App개발 기술과의 융합을 통한 원격 모니터링, 농가 내 농작물의 복합적인 성장환경 변화를 측정할 수 있는 센싱 기술, 센서와의 연결과 환경 제어를 위한 제어시스템과의 융합 등에 대한 농업관련 ICT 기기들의 표준화를 추진하여 스마트 농업의 선두 주자로 활약하길 기대한다.

적 요

Remote sensing는 각종 센서를 이용하여 지표면, 물, 대기 현상에 대해 비접촉, 비파괴적인 방법으로 필요한 정보를 얻어내는 기술이다. 이들 기술은 센서 등의 요소 기술뿐만 아니라, 센서를 탑재하는 플랫폼과 정보 통신 기술(ICT) 등을 복합적으로 이용한다. 특히 농업 분야에서는

ICT를 중개로 기상이나 토양 등의 환경 정보와 작물 정보를 측정하여 수치화하고 클라우드 컴퓨팅에 의해 생산 단계뿐만 아니라 유통 및 소비 단계까지 관리하는 스마트 농업에 크게 기여한다. 식물을 측정하기 위해서는 비파괴 비접촉 bioimaging (remote imaging)을 포함한 식물 기능 remote sensing 기술개발이 필요하다. 또한 식물 과학 분야에서도 유전자·세포 수준에서 개체 수준까지를 대상으로 한 bioimaging 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 들어 표현형 연구를 통해 환경과 유전자형의 관계를 구명하는 phenomics 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 식물기능 원격탐사의 기술동향, 식물 진단 및 식물환경응답해석과 식물 phenomics 연구현황에 대해 고찰하였다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(과제 번호: 314039-2)의 지원으로 수행되었음.

References

- Berger B, Parent B, Tester M (2010) High-throughput shoot imaging to study drought responses. *Journal of Experimental*

- Botany 61:3519-3528
- Furbank RT (2009) Plant phenomics. *Funct Plant Biol* 36:845-1026
- Granier C, Aguirrezabal L, Chenu K, Cookson SJ, Dauzat M, Hamard P, Thioux JJ, Rolland G, Bouchier-Combaud S, Lebaudy A, Muller B, Simonneau T, Tardieu F (2006) PHENOPSIS, an automated platform for reproducible phenotyping of plant responses to soil water deficit in *Arabidopsis thaliana* permitted the identification of an accession with low sensitivity to soil water deficit. *New Phytologist* 169:623-635
- Hartmann A, Czauderna T, Hoffmann R, Stein N, Schreiber F (2011) HTPPheno: An image analysis pipeline for high-throughput plant phenotyping. *BMC Bioinformatics* 12:148
- Ishimura A, Shimizu Y, Rahimzadeh Bajairan P, Omasa K (2011) Remote sensing of Japanese beech forest decline using an improved Temperature Vegetation Dryness Index (iTVDI). *iForest* 4:195-199
- Iyer-Pascuzzi AS, Symonova O, Mileiko Y, Hal Y, Belcher H, Harer j, Weitz JS, Benfey PN (2010) Imaging and Analysis Platform for Automatic Phenotyping and Trait Ranking of Plant Root Systems. *Plant Physiology* 152:1148-1157
- Jones HG (2004) Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Adv Bot Res* 41:107-163
- Jones HG, Morison J (2007) Imaging Stress Responses in Plants. *J Exp Bot* 58:743-898
- Jones HG, Serraj R, Loveys BR, Xiong L, Wheaton A, Price AH (2009) Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology* 36:978-989
- Kim JW (2010) Trend and direction for plant factory system. *J Plant Biotechnol* 37:442-455
- Kolukisaoglu U, Thurow K (2010) Future and frontiers of automated screening in plant sciences. *Plant Science* 178:476-484
- Lee JY, Kim SH, Lee SB, Choi HJ, Jung JJ (2014) A study on the necessity and construction plan of the internet of things platform for smart agriculture. *J Korea Multimedia Society* 17(11):1313-1324
- Lee SY, Kim JM, Hwang DH (2014) A Study of Big-Data System Based on Data Stream. *J Korea Multimedia Society* 18(1):8-15
- Megan AH, Amit KS, Parvesh S, Scott CB, Brij MM (2011) Nanoparticles as contrast agents for in-vivo bioimaging: current status and future perspectives. *Anal Bioanal Chem* 399:3-27
- Montes JM, Technow F, Dhillon BS, Mauch F, Melchinger AE (2011) High-throughput non-destructive biomass determination during early plant development in maize under field conditions. *Field Crops Research* 121:268-273
- Omasa K (2014) Remote sensing of plant functioning –Applications in plant diagnosis and phenomics researches. *Eco-Engineering* 26(2):51-61
- Omasa K, Hashimoto Y, Aiga I (1981) A quantitative analysis of the relationships between O₃ Sorption and its acute effects on plant leaves using image instrumentation. *Environ Control Biol* 19:85-92
- Omasa K, Onoe M, Yamada H (1985) NMR imaging for measuring root system and soil water content. *Environ Control Biol* 23:99-102
- Omasa K, Shimazaki K, Aiga I, Larcher W, Onoe M (1987) Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiol* 84:748-752
- Omasa K, Takayama K (2003) Simultaneous measurement of stomatal conductance, non-photochemical quenching, and photochemical yield of photosystem II in intact leaves by thermal and chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Cell Physiol* 44:1290-1300
- Riedelsheimer C, Czedik-Eysenberg A, Grieder C, Lisec J, Technow F, Sulpice R, Altmann T, Stitt M, Willmitzer L, Melchinger AE (2012) Genomic and metabolic prediction of complex heterotic traits in hybrid maize. *NATURE GENETICS* 44:271-222
- Robert AH, Rebecca LP (2009) Hypertriglyceridemia: phenomics and genomics. *Mol Cell Biochem* 326:35-43
- Sirault XRR, James RA, Furbank RT (2009) A new screening method for osmotic component of salinity tolerance in cereals using infrared thermography. *Functional Plant Biology* 36:970-977
- Tracy SR, Roberts JA, Black CR, McNeill A, Davidson R, Mooney SJ (2010) The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *Journal of Experimental Botany* 61:311-313