

Omasa, Kenji. 2006. Section 5.1 Image Sensing and Phytobiological Information, pp. 217-231 of Chapter 5 Precision Agriculture, in CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology. Edited by CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE. Copyright American Society of Agricultural Engineers.

Çevirmen: Mehmet Metin ÖZGÜVEN

Çeviri Editörleri: Sefa TARHAN ve Mehmet Metin ÖZGÜVEN

5. Bölüm: Hassas Tarım

5.1 Görüntü Algılama ve Fitobiyolojik Bilgi

Yazar: K. Omasa

Çevirmen: Mehmet Metin ÖZGÜVEN

Özet: *Bitkiler ve topraklar hakkındaki fitobiyolojik bilgi, makineleşmeyi ve sürdürülebilir tarımsal sistemleri optimize etmek için kullanışlıdır. Bu bölümde, fitobiyolojik bilgi elde etmek için gelecek vadede görüntü algılama teknikleri kısaca tanıtılmış ve bitki üretimi için bir fitobiyolojik bilgi sistem (PIS, Phytobiological Information System) kavramı ve sürdürülebilir tarım tarif edilmiştir.*

Anahtar Kelimeler: *Görüntüleme, Floresans, Fitobiyolojik bilgi tekniği, Bitki işlevi, Spektral görüntü, Sürdürülebilir Tarım, Termal görüntü, Üç boyutlu (3D).*

5.1.1 Giriş

Hassas tarım, tarımsal üretim sistemlerinin bilgisayarlaşması ve bilgisayarlı kontrol sistemlerinin ağ iletişimi ile gelişmiştir [1-3]. Kontrollü seraların akıllı bitki üretim sisteminde, sensörler ile ölçülen bitki reaksiyonu hakkında bilgi, sistemi optimize etmek için kullanılır. Özellikle görüntü araçları tarafından elde edilen canlı bitkilerin şekilleri, bileşenleri ve fonksiyonları hakkındaki bilgi, üretim işlemlerinin tanı ve kontrolü için etkin biçimde kullanılmaktadır. Böyle bir yaklaşım, “konuşan bitki yaklaşımı (SPA, Speaking Plant Approach)” olarak bilinmektedir [4]. Biyoteknoloji ve mikroçoğaltmadaki son gelişmeler, SPA'nın hücreler ve dokular düzeyinde geliştirilmesinin önemini göstermektedir.

Bu arada, sürdürülebilir ve çevresel ziraat mühendisliğine ilgi artmaktadır [3,5,6]. Hassas tarım, geri dönüşümlü tip tarım ve kontrollü tarımsal ormancılığı içeren ziraat mühendisliğinin yeni tipleri; bitkisel üretimdeki artışları, küresel çevre sorunlarının üstesinden gelmek için çevre koruma ve iyileştirmeye uyumlu hale getirebilir. Bitkiler ve tarımsal ekosistemlerin işleyişi hakkında yararlı mekansal bilgi sağladığından dolayı uydulardan, uçaklardan ve araçlardan, vb. sağlanan hiyerarşik uzaktan algılama yöntemi; ziraat mühendisliğinin yeni tipi için güçlü bir araçtır. Örneğin, hassas tarım ile birlikte kullanılan uzaktan algılamadan gelen mekansal

bilgi; bölgesel ihtiyaca göre gübreleme, yabancı ot ve zararlıların bölgesel kontrolü ile daha doğru tarımsal faaliyetler yapılmasını sağlar [3,7]. Özellikle otonom araçları kullanan hassas tarım; bitkiler ve topraklar hakkında fitobiyolojik bilgiler elde etmek için yakın çekim uzaktan algılamayla birleşme ihtiyacı vardır. Hiyerarşik uzaktan algılama için uydular ve uçaklardan elde edilen uzaktan algılama verisi, yakın çekim uzaktan algılamadan elde edilen kesin fitobiyolojik veri ile doğrulanması gerekmektedir.

Bu bölümde, bitkiler ve topraklar hakkında fitobiyolojik bilgi elde etmek için görüntü araçları ve yakın çekim uzaktan algılamada gelecek vadeden görüntü algılama teknikleri tanıtılmış ve daha sonra uydular ve uçaklardan gelen geniş alanların uzaktan algılama içeren görüntü algılama kullanımı için PIS kavramı açıklanmıştır.

5.1.2 Fitobiyolojik Bilgi Elde Etmek İçin Görüntü Algılama Teknikleri

Tablo 1, bitkiler ve topraklar hakkında fitobiyolojik bilgi elde etmek için tipik görüntü algılama tekniklerini göstermektedir. Görüntü algılama tekniklerindeki eğilimler; hiperspektral, 3D ve aktif algılamayı içermektedir. Sıradan multispektral görüntüleme; bireysel bitkiler ve bölümlerinin renk, pigmentler, şekil ve büyümesi; bitkilerdeki ve topraklardaki su durumundaki değişimler ve toprak özellikleri hakkında fitobiyolojik bilgi elde etmek için uygundur [8-13]. Sıradan *multispektral* analiz ile karşılaştırıldığında *hiperspektral* görüntü algılama; görünür ışıktan kısa dalga kızılotesine kadar olan bölgedeki birkaç yüz spektral bantı çözme yeteneğine sahip olup ve sürekli spektral özelliklerin analiziyle, daha fazla fitobiyolojik bilgi sağlamayı mümkün kılabilir. *Termal kızılotesi* görüntüleme (bir pasif spektral görüntüleme yöntemi), bitkiler ve toprakların yüzey sıcaklıklarının ölçülmesinin yanısıra bitki streslerini erken algılaması için etkilidir. Yaprak ve kanopi üzerindeki enerji dengesinin görüntü analizi, stomaların tepkisi ve bitki su tüketimi üzerinde fitobiyolojik bilgi sağlar [15-17]. Kararlı durum lazerli uyarılmış floresans (LIF, Laser Induced Fluorescence) spektral analizi gibi *floresans* görüntü algılama yöntemleri (aktif yöntemler), floroforlarla bağlanmış hücre duvarlarındaki değişimler ve bitki pigmentlerinin artırılması hakkında fitobiyolojik bilgi sağlar [18,19]. *Klorofil a* floresans indüksiyon analizi, sadece biyotik ve abiyotik stresler tarafından fotosentetik faaliyete neden olan ve stomaların açıklığı içinde parçalı değişimlerinin

Tablo 1. Bitkiler ve topraklarda fitobiyolojik bilgi elde etmek için görüntü algılama teknikleri.

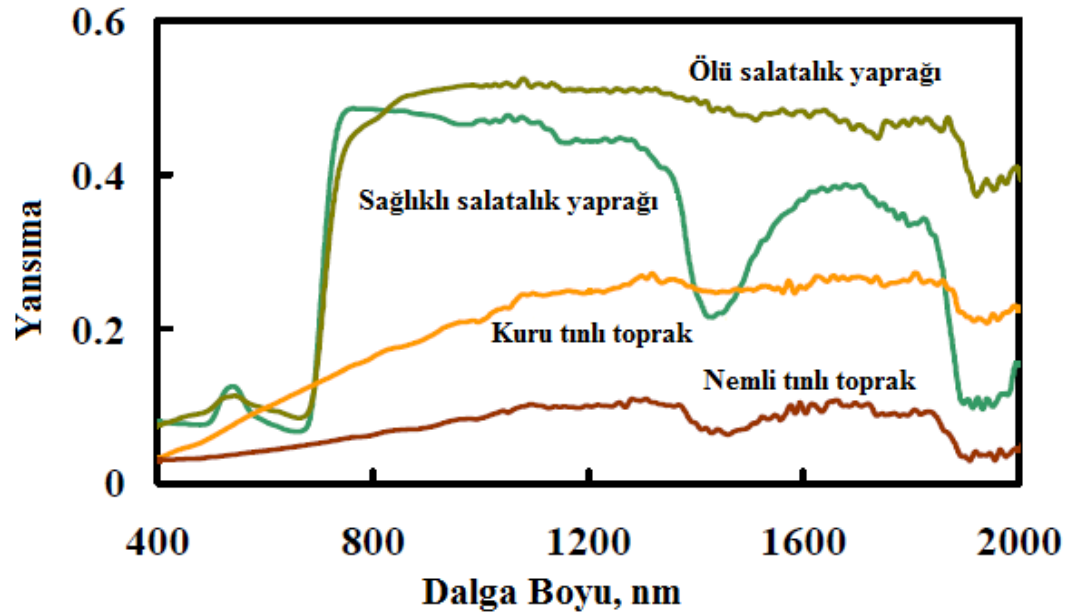
Görüntü Algılama Teknikleri	Fitobiyolojik Bilgi
<ul style="list-style-type: none"> • Multi veya hiperspektral görüntü algılama (Kızılötesi yakınından UV'un yakınına doğru, renk içeren). • Termal görüntü algılama • Floresans görüntü algılama (LIF,Chl floresans, vb.) • 3D yüzey görüntü algılama (stereo, x şeklinden, lazer tarayıcı) • 3D ışık mikroskopik görüntüleme • CT (X-ray CT, MRI, optik CT, vb.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Renk, şekil ve bireysel bitkiler ve bölümlerinin büyümesi, bitki pigmentleri, su durumu, toprak özellikleri • Sıcaklık, bitki su tüketimi, stomaların tepkisi • Bitki pigmentlerini beyazlatma, mezofil içinde floroförlerin hareketi, fotosentetik sistem • 3D yüzey yapısı, bitkiler ve kanopilerdeki biyokütle • 3D yapı ve hücreler ve dokulardaki fonksiyonlar • 3D yapı ve içeriği, dokular ve bitkilerdeki biyokimyasal bileşenlerin metabolizması ve transferi

erken tanısı için değil, aynı zamanda bitişik yaprakların fotosentetik aparatının gelişimi hakkındaki bilgi içinde kullanılır [20,21]. Çift stereo görüntüleri ve lazer tarayıcıları (telemetre tarama) gibi *3D yüzey görüntüleme*, bitkiler ve kanopilerin büyümesi ve 3D yapısının uzaktan tahminini mümkün kılmaktadır [22-25]. *Aynı odaklı lazer tarama mikroskop sistemi* (büyük bir çalışma mesafesi ile yeni bilgisayarlaştırılmış ışık mikroskop sistemi) ve bilgisayarlı tomografi (CT, Computed Tomography) teknikleri aynı zamanda hücreler, fideler ve bitkilerde 3D yapılar ve fonksiyonları hakkında bilgi sağlamaktadır [10,26-29].

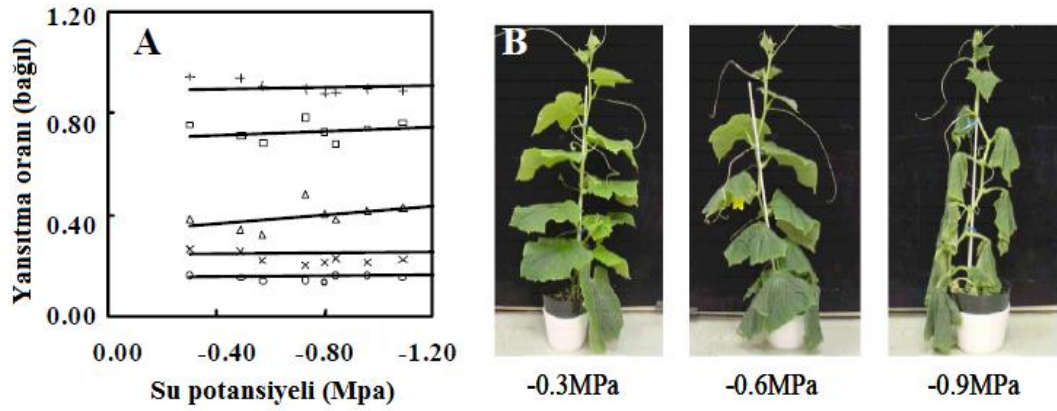
5.1.3 Multispektral veya Hiperspektral Görüntü Algılama

Görünür ile kısa dalga kızılötesi bölgesi arasında (400-2,500 nm) bitkiler ve topraklardan yansıma spektrumları büyük miktarda fitobiyolojik bilgi içermektedir [8,12,30,31]. Sağlıklı ve ölü (kuru) salatalık yaprakları ve nemli ve kuru tınlı toprakların tipik yansıma spektrumları Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapraktaki klorofil, karoten ve ksantofil gibi fotosentetik pigmentlerin emilimi görünür bölgedeki 400-700 nm arasındaki bölgede yoğunlaşmıştır [8,30,31]. Pigmentlerin her biri 300-500 nm bölgesinde azami emilime sahip olmasına rağmen sadece 600-700 nm kırmızı bölgenin yanı sıra mavi bölgedeki dalgaları klorofil emmektedir. Yaprak yansıması büyük ölçüde 690-740 nm (kırmızı kenar)'lik bölgede artmakta ve toprağın yansımasındaki değişiklik önemsiz olmasına rağmen, 1300 nm (yakın kızılötesi)'ye kadar yüksek bir değere sahiptir. Yakın kızılötesi bölgesi, yaprak içinde hücre yapısı ve kırılma indeksleri tarafından etkilenmektedir. Su emilimi sağlıklı yapraklar ve nemli toprakta 900-2500 nm'lik yakın kızılötesi ve orta kızılötesi bölgelerine hakimdir ve suyun büyük emme bantları 1450-1940 nm'de meydana gelmekte ve küçük emilim bantları 960-1200 nm yakınında görünmektedir. Karbonhidratlar (nişasta ve selüloz), protein, lignin, N, P, K ve Mg gibi diğer biyokimyasal bileşenler, 900-2500 nm'lik kısa dalga kızılötesi bölgesinde azami emilime sahip olmaktadır. Bu emilime katkı yapan moleküler fonksiyonel gruplar C-H, O-H ve N-

H ile sınırlıdır [30]. Ancak, bitkilerde su stresinin etkilerini ve biyokimyasal bileşenlerin içeriğini tahmin etmek için optimum yansımaya bantlarının ve azami emilim olması gerekmediğine dikkat edilmelidir [9,30,32].



Şekil 1. Sağlıklı ve ölü (kuru) salatalık yapraklarının ve nemli ve kuru tınlı toprakların tipik yansımaya spektrumları.

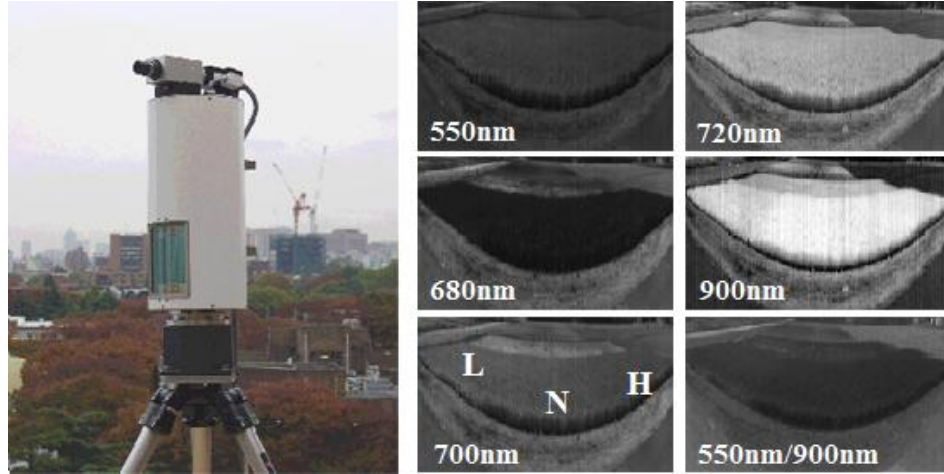


Şekil 2. (A) -1.2MPa üstünde su potansiyeli ile geri kazanılabilir salatalık yapraklarının yansımaya bant oranındaki değişimler (B) bitkiler [32]. A: semboller x = 550 nm/850 nm bant oranı; o = 680/850; + = 1,200/850; Δ = 1,450/850; = 1,650/850.

Multispektral görüntü algılama için görünür ile yakın kızılötesine kadar olan bölgedeki özel yansımaya özellikleri ile birkaç bandın spektral analizi yaygın olarak kullanılmaktadır [9-11,33]. Yüksek yaprak yansımaları ile yakın kızılötesi bölgenin kullanımı toprak zeminden gelen bitkilerin kolay ayrılmasına izin vermektedir. Renk bilgisi (ton, canlılık, açıklık) içeren görünür bölgenin spektral analizleri; yaprak, taç

yaprak, meyve, bitkilerin başka bölümleri ve büyüme analizlerine ayrılması için etkilidir. Yaprak su durumu, spektral yansıma kullanılarak tahmin edilmiştir [32,34-36]. 850 nm ile 1450 nm arasındaki bant oranı, bir kuru yaprağın su potansiyeli olan -7,1 MPa'nın üstünde su potansiyelleri aralığında iyi bir doğrusal ilişki ($R^2 = 0.91$) göstermiştir fakat -1.2 MPa'nın üstünde su potansiyeline sahip geri kazanılabilir yaprakların bant oranında meydana gelen sadece küçük değişiklikler meydana gelmiştir (Şekil 2) [32].

Bitki pigment içeriğindeki değişimler, spektral yansıma bantlarının oranlarına göre değerlendirilmiştir. Örneğin, *klorofil a* içeriği 550 ve 900 nm bant oranı kullanılarak tahmin edilmiştir ($R^2 = 0.90$) [9]. Kırmızı kenarda değişiklik ayrıca klorofil içeriğine bağlıdır. Bu nedenle bu analizler, klorofil içeriğinde değişimlere neden oldukları besin eksikliği belirtilerini tespit etmek ve diğer yaralar için kullanılmıştır [30,31]. Şekil 3, taşınabilir taramalı telemetre (lidar) ile birleştirilmiş hiperspektral kamera ve farklı azot gübresi miktarları altında yetiştirilmiş buğday bitkilerinin tipik spektral yansıması ve bant oranı görüntülerini göstermektedir. Spektral yansıma görüntüleri, hiperspektral kamera tarafından 1 nm aralıklarla ölçülmüştür. Şekil 1'de görüldüğü gibi, 400 ile 700 nm arasındaki görünür bölgedeki spektral yansıma, bu dalga boyları yaprağın fotosentetik pigmentleri tarafından emildiği için küçük kalmıştır. Özellikle, yansıma *klorofil a*'nın maksimum (680 nm) emiliminde minimum göstermiştir. Şekil 3'de 550 nm ile 900 nm'nin bant oranı, buğday alanında *klorofil a* içeriğiyle iyi bir doğrusal ilişkiye sahiptir ve *klorofil a* azotlu gübre miktarına bağlıdır. Bu nedenle bu bant oranı, optimum gübre miktarı bulmak için etkin kullanılmaktadır.



Şekil 3. Hiperspektral kamerasına (solda) taşınabilir telemetre tarama (lidar) bağlanmış ve tipik spektral yansıma ve azotlu gübrenin farklı miktarları altında kültür buğday bitkilerinin bir alanın bant oranı (sağda) görüntüleri (L = düşük, N = normal, H = yüksek).

Kırmızı ve yakın kızılötesi spektral bölgelerinden elde edilen bazı vejetasyon indeksleri, toprak gibi arka plandan vejetasyon bilgisinin çıkarılmasının yanı sıra, olası net birincil üretim (NPP, Net Primary Production) ve yaprak alan indeksi (LAI,

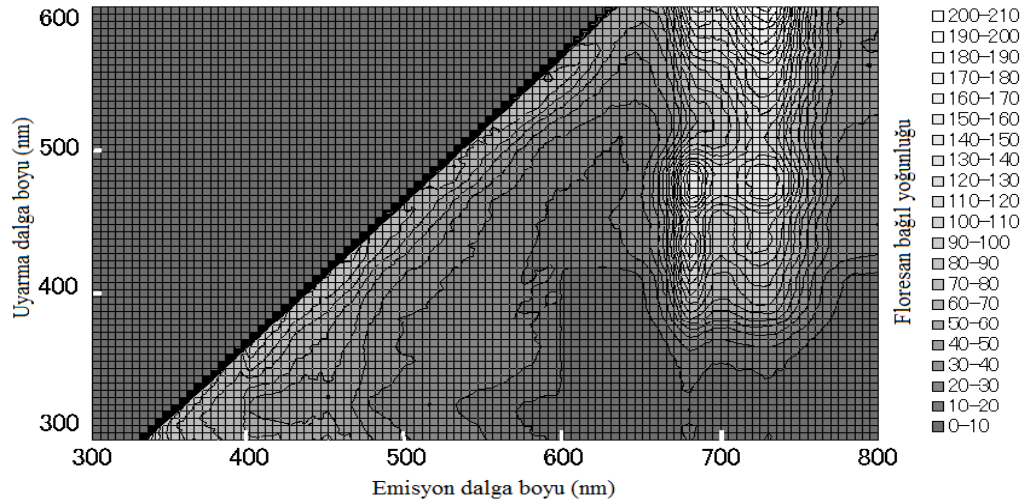
Leaf Area Index) tahminini mümkün kılmıştır [8,31,37]. Hiperspektral analiz; bitkilerin verimlilik ve stresleri, canlı bitkilerdeki ve topraklardaki biyokimyasal ve mineral bileşenler, türlerin sınıflandırılması ve bitki bölümleri ve toprak tipleri hakkında daha fazla fitobiyojik bilgi sağlayabilir.

5.1.4 Floresans Görüntü Algılama

Floresans görüntü algılama, aktif bir algılama tekniğidir. Fitobiyojik bilgi, aktinik (ısı geçirir) ışık ile aydınlatılmış canlı bitkilerdeki floroforlardan yayılan floresansın ölçülmesi ile elde edilmektedir [18-21].

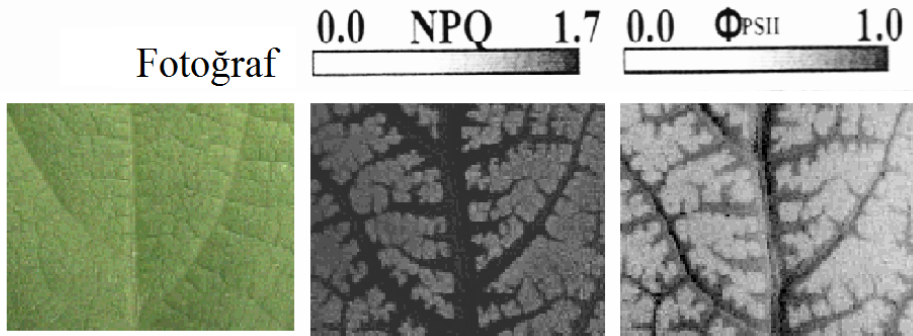
Şekil 4, sağlıklı bir salatalık yaprağının kararlı durum floresansı hakkında uyarma ve emisyon matrisini göstermektedir. Yaprak, görünür ışık (yaklaşık 380-600 nm) ile aydınlatıldığında, yaklaşık 660-770 nm spektral aralığında çok kuvvetli yoğunluğa sahip floresans *klorofil a*'dan yayılır. Mavi ve yeşil floresans; hücre duvarına bağlı fenolikler, vakuollerdeki bileşikler ve ultraviyole ışınları tarafından uyarılan diğer floroforlar tarafından yayılır ve klorofil, karoten ve ksantofil gibi fotosentetik pigmentler tarafından geri emilir [19,38]. Bu nedenle ultraviyole ile kırmızı (300-800 nm) bölge arasındaki alanda kararlı durum floresansına ilişkin spektral analizleri, bitki pigmentleri, hücre yapısı ve zarlardaki değişimlerin erken tanısı için kullanılmıştır [18,19,38,39]. LIF, yukarıda bahsedilen değişimlerin uzaktan izlenmesi için etkin olabilmektedir [17,39]. Harici floresans problemlerinin kullanımı, hücreler ve dokularda bileşenlerin hareketleri ve yapıları gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır [26]. Ancak, floresansın belirsizliğine ve çevreye olan bağımlılığına dikkat etmeliyiz.

Klorofil a floresans, aynı zamanda fotosentetik sisteminin incelenmesi için kullanılmış ve fotosentezin yayılmacı olmayan analizi için güçlü bir araçtır [40,41]. Yapraklarda klorofil floresans sönümlenmesinin görüntü algılaması, komşu dokularda uniform olmayan fotosentetik yanıtları vermekte ve fotosentetik aparatların içinde inhibisyon yerlerinin belirlenmesine izin verebilmektedir. Orijinali Omasa ve ark. [42] ve Daley ve ark. [43] tarafından geliştirilen bu teknikler; hava kirleticileri, düşük O₂ konsantrasyonu, su eksikliği, UV ışığı, üşüme, tarım kimyasalları gibi abiyotik stresler ile biyotik stresler tarafından sebep olunan fotosentetik faaliyetler ve parçalı stoma cevaplarındaki değişimlerin erken tanısı için kullanılmaktadır [42-49].

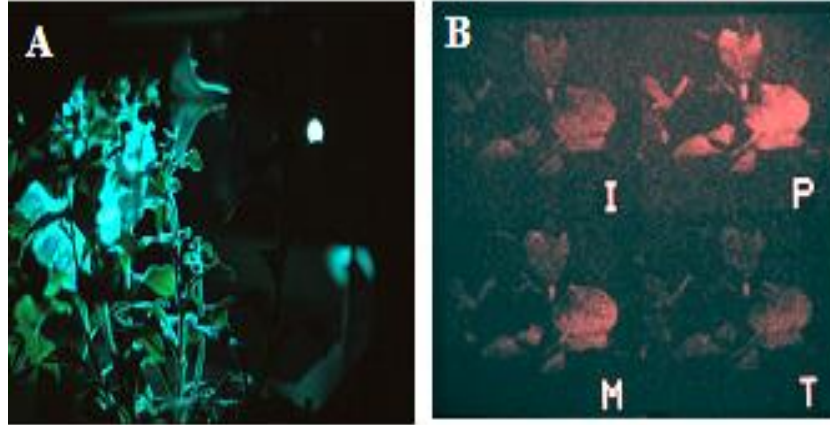


Şekil 4. Sağlıklı bir salatalık yaprağının kararlı durum floresansın uyarma ve emisyon matrisi.

Toprağa 1/1000'lik seyreltilmiş herbisit (Nekosogi-ace) uygulamasından 2 gün sonra bir salatalık yaprağının PSII elektron taşınımının kuantum verimini (Φ_{PSII}) ve fotokimyasal olmayan söndürmenin görüntüleri (NPQ, Nonphotochemical Quenching) ve yaprak fotoğrafı Şekil 5'de gösterilmektedir. Sonuç; tedaviden iki gün sonra gözle görünür bir yaranın olmadığı damarlar yakınındaki bölgelerde herbisit içerisinde bulunan DCMU (3-(3,4-diklorofenil)-1,1-dimetilür) tarafından neden olunan PSII'den elektron taşınmasındaki azalmayı göstermektedir. Ayrıca bu sonuç, elektron taşınmasındaki azalma neticesinde *trans* tilakoid proton gradyan oluşumundaki inhibisyonu ve CO₂ özümlemesinde azalmayı göstermektedir. Teknikler aynı zamanda, bağlı yaprakların ve kültüre alınmış dokuların fotosentetik aparatının gelişiminin tanısı ve analizinde kullanılabilir [50-52]. Son zamanlarda, NPQ analizi için sahada taşınabilir görüntüleme sistemleri [48,53] ve uzaktan klorofil floresans geçişlerini ölçmek için LIF görüntüleme sistemi (Şekil 6'ya bakılabilir) geliştirilmiştir.



Şekil 5. Fotoğraf, NPQ görüntüleri ve toprakta herbisit (Nekosogi-ace) uygulamasından 2 gün sonra salatalık yaprağına bağlı Φ_{PSII} [49].



Şekil 6. (A) LIF görüntüleme sistemi ve (B) klorofil floresans geçişleri görüntüleri [45].

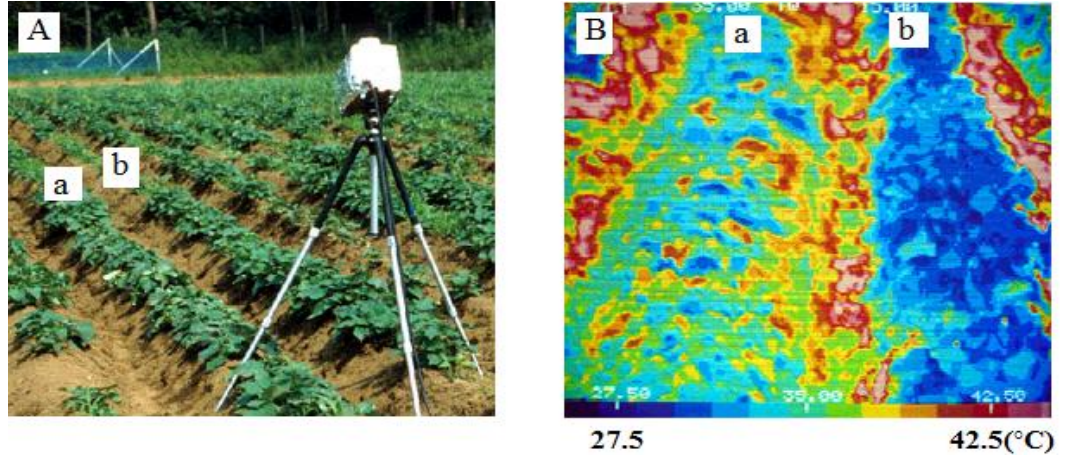
5.1.5 Termal Görüntü Algılama

Su, alt stomaların boşluğunda mezofil hücre duvarlarından buharlaşır ve yapraklar ve kanopilerin sınır katmanları ve stomalar yoluyla atmosfere yayılır. Fotosentez için CO₂ ile birlikte hava kirleticileri, yaprağa ters yönde girmektedir [54,55]. Termal çevre (hava sıcaklığı, nem, radyasyon, hava akımı, vb.) nispeten sabit tutulduğu zaman yaprak sıcaklığı, stomaların tepkisi, terleme ve CO₂ (fotosentez) emilimi ve hava kirleticiler gibi fitobiyolojik bilgi sağlamaktadır [9,10,14-17].

Termografi sistemleri, stomaların iletkenliği (=1/stomalar direnci) ve gaz değişimi hakkında bilgi edinmek amacıyla bitkiler ve kanopilerin (toprak dahil) sıcaklıklarındaki değişimlerin uzaktan ölçümü için sıklıkla kullanılmıştır [9,14,17,56-58]. 1970'lerin ikinci yarısında, bilgisayar ile birleştirilmiş termografi sistemi, yaprak sıcaklığının görüntü analizi için geliştirilmiştir [14,56]. Bunun sonucunda Omasa ve ark. [15,59,60] yaprak sıcaklığını kullanarak, bağlanmış yaprağın tümü üzerinde hava kirleticilerin emilim oranları, terleme oranları ve stoma direncinin mekansal dağılımlarını kantitatif incelemiştir. Bitkilerin bütün yaprakları üzerinde enerji dengesinin kantitatif analizi zor olmasına rağmen son zamanlarda böyle bir kantitatif çalışma, termal görüntü algılamanın bir araştırma alanı olduğu fark edilmiştir [16].

Tarlada yetiştirme koşulları altında bitkiler ve kanopilerin terleme oranlarını ve stomaların iletkenliğini mekansal değerlendirmek de çok zordur. Ancak bir termal görüntü, bitki streslerinin erken tespiti için bilgi sağlayabilir (Şekil 7'ye bakılabilir). Ancak termal görüntüleme, görünür yara ortaya çıkmadan önce stomaların kapanması meydana geldiğinden dolayı bitki streslerinin erken belirlenmesi için bilgi sağlayabilir. Ayrıca bu yöntem kararlı ısıl çevre şartları altında yüksek büyüme gösteren bitkilerin seçiminde kullanılabilir [9,17]. Bir termal kameranın kullanıldığı helikopter destekli uzaktan algılama, kanopilerin çevresel streslerinin erken

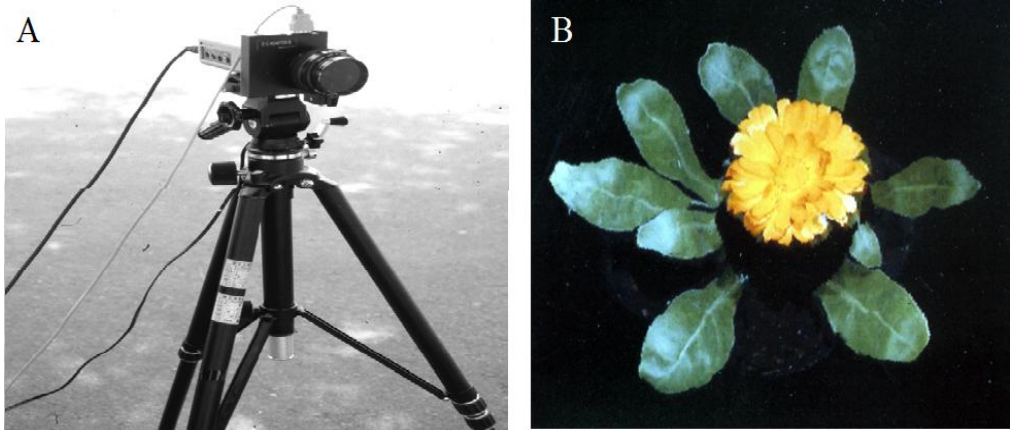
tespitinde etkili olmuştur [17]. Mikroskobik termal görüntüler çeltik bitkilerinin damarları arasındaki bölgelerde stomaların tepkileri hakkında bilgi sağlamıştır [61].



Şekil 7. Bir sürülmüş alanda, tatlı patates bitkilerinin yaprak sıcaklığının stomaların kapanmasına etkileri. A, fotoğraf, B, termal görüntü, a, stoma kapalı, b, açık stoma. Hava sıcaklığı 30 °C.

5.1.6 Üç Boyutlu (3D) Görüntü Algılama

Yüzey yapısının ölçümü için kullanılan üç boyutlu (3D, Three-Dimensional) görüntü algılama teknolojisi, genellikle pasif teknikler ve aktif teknikler olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. *Pasif teknikler*; shape from x yöntemleriyle, stereo eşleştirilmiş görüntüler veya monoküler görüntülerden (örneğin, mesafe görüntüsü veya derinlik görüntüsü) 3 boyutlu bir görüntüyü yeniden oluşturmaktadır. *Aktif teknikler*, lazer ışığı gibi elektromanyetik dalgalara maruz kalmış nesnelerin parlamasından 3D şekil görüntüsü elde eder [22-25,27]. Pasif teknolojisiyle karşılaştırıldığında genellikle daha pahalı olmasına rağmen aktif teknoloji, dokusu açıkça görünmeyen nesnelerin tam 3D görüntülerini sağlar ve daha kullanışlı fitobiyolojik bilgi verebilir. Şekil 8'de bizim tarafımızdan geliştirilen pasif, 3 boyutlu renkli CCD kamera görülmektedir [29]. Değiştirilmiş odakta şekil elde etme (MSF, Modified Shape from Focus) algoritması kullanan kameranın, odak düzleminin değiştirilmesiyle elde edilen dokuz renkli görüntü serisinden hesaplanan, çiçekli bir bitkinin 3D doku haritalama görüntüsü de aynı şekil içerisinde verilmiştir. Bu algoritma, dokusu açıkça görünen nesnelerin görüntü işleme için çok uygundur fakat parlak dokulu olanlar için uygun olmamıştır. Bu sınırlama bir kontrollü desen ile nesnelerin aydınlatması ile azaltılmıştır.



Şekil 8. (A) Pasif 3 boyutlu renkli CCD kamera ve (B) değiştirilmiş bir odak şekil (MSF) algoritması ile hesaplanan (saksı kadife çiçeği) çiçekli bitkinin 3 boyutlu doku haritalama görüntüsü.



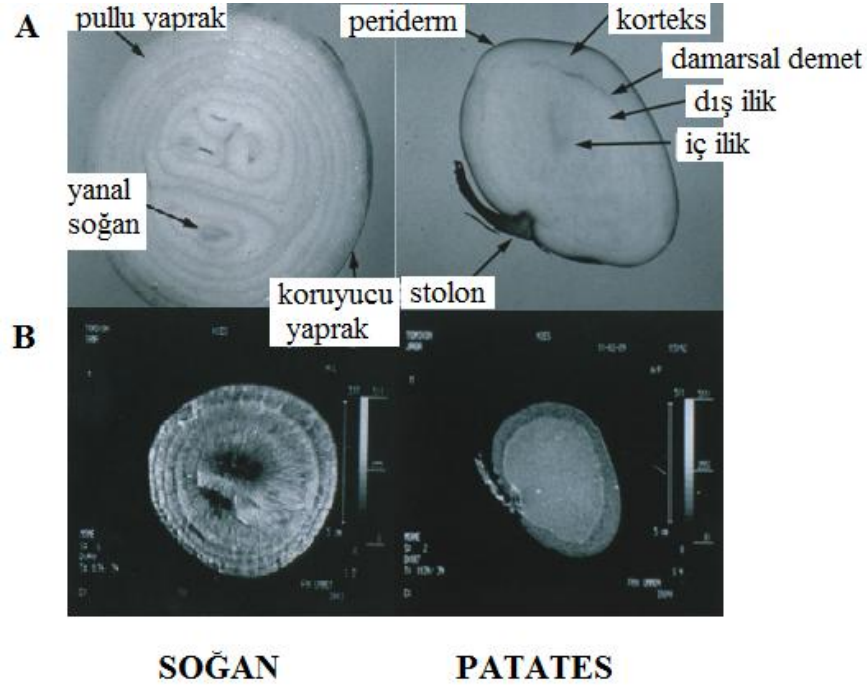
Şekil 9. (A) Sokak ağaçlarının mesafe görüntüsü ve (B) telemetre tarama ile ölçülen bir saksıda bitkinin 3 boyutlu görüntüsü.

Şekil 9 caddedeki ağaçların mesafe görüntüsü ve yaprakların geniş yansıması ile yakın kızılötesi aralığındaki lazer ışığını kullanan taramalı telemetre (Şekil 3'e bakılabilir) ile ölçülmüş saksıdaki bitkinin 3D görüntüsünü gösterir. Saksı bitkisi için nirengi (üçgenlere bölme) prensibiyle ve caddedeki ağaçlar için lazerin havada kaldığı süre (time of flight) ölçülerek mesafe görüntüleri elde edilmiştir. Omasa ve ark. [24], küçük ayak izli (onlarca santimetreden az) bir lazer ışını ile tüm kanopiye tarayabilen helikopter destekli ve taramalı yeni bir lidar sistemini kullanarak 3D kanopi yapısı ve zemin yüzeyini tahmin etmektedir.

Bu arada, aynı odaklı *lazer tarama mikroskobu* (CLSM, Confocal Laser-Scanning Microscope) genellikle yüksek büyütmede, hücreler ve dokuların 3 boyutlu yapısı hakkında bilgi elde etmek için kullanılmıştır [26,27]. Bu sistemde, yapısal aynı odaklı düzlemlerde elde edilen çok sayıda iki boyutlu görüntülerin istiflenmesiyle 3 boyutlu görüntü yapılmaktadır. CLSM, özellikle harici floresans

problar kullanan floresans görüntüleme yeteneğine sahiptir ve tek renkli veya sahte renkli görüntüler şeklinde hücrelerin ve dokuların içerisindeki biyokimyasal bileşenlerin 3D yapıları ve hareketleri hakkında bilgi sağlayabilir. Ancak doğal yetiştirme koşulları altında geniş bir büyütme aralığında hücreler ve dokuların, yerinde gözlem için CLSM kullanımı zordur. Yukarıda verilen durumda lazer, çok dar bir çalışma mesafesinde çalıştırıldığından ve ayarlanması gerektiğinden, hedef hücrelerin fizyolojik reaksiyonlarını etkilemesi sebebiyle bu problem ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden, geniş bir büyütme aralığında ve farklı yetiştirme şartları altında bozulmamış bitkiler/hücrelerin şekli ve büyümesinin 3D doğal renk ölçümlerinin elde edilmesi için bilgisayarlı yeni bir CCD video ışık mikroskobu sistemi tarafımızdan geliştirilmiştir [29]. Tohuma su verildikten sonra bu sistem, bozulmamış petunya fidanlarının 3D ölçümüne uygulanmıştır.

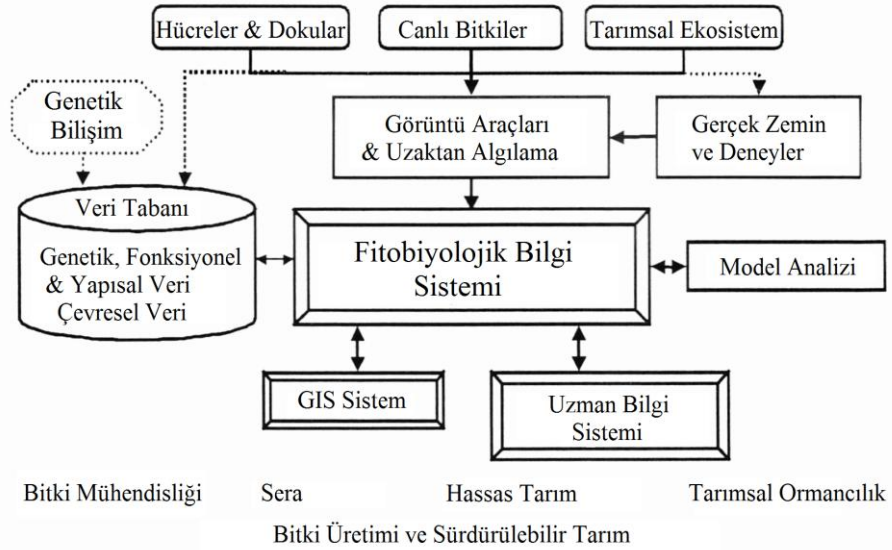
Manyetik rezonans görüntüleme (MRI, Magnetic Resonance Imaging) ve x ray CT sistemler; hücreler, fideler, bitkiler ve tarımsal ürünlerin iç ve dış 3D yapıları ve fonksiyonları hakkında bilgi sağlamaktadır. Örneğin; bitkilerin kök sistemleri, toprak su içeriğindeki farklılık ve bitki içerisindeki su hareketleri, MRI ve x-ray CT ile üç boyutlu olarak ölçülmüştür [10,28,61]. Bu sistemler, aynı zamanda meyveler ve sebzeler gibi tarımsal ürünlerin yapıları ve fonksiyonlarına ilişkin araştırmalar için de kullanılabilir(Şekil 10).



Şekil 10. (A) Kesit fotoğrafları ve (B) soğan ve patateslerin MRI görüntüleri.

5.1.7 Fitobiyolojik Bilgi Tekniği

Şekil 11, bitkisel üretim ve sürdürülebilir tarım için fitobiyolojik bilgi tekniğinin kavramsal akışını göstermektedir. PIS, veri tabanı ve model analizinde iş gören bir yönetim sistemidir. Bu sistem internet gibi ağ sistemleri üzerinden diğer



Şekil 11. Bitkisel üretim ve sürdürülebilir tarım için fitobiyolojik IT kavramsal bir akış.

coğrafi bilgi sistemleri (GIS, Geographic Information System) ve uzman bilgi sistemleri ile bağlantılıdır. Söz konusu PIS sisteminde; sürdürülebilir tarım için hem bitkisel üretimi arttırmayı hemde su, gübreler ve kimyasalların kullanımının optimizasyonu başarmak için diğer yöntemlerle elde edilmiş fitobiyolojik ve çevre bilgileri ve model analizinin sonuçlarıyla birlikte, hücrelerden tarımsal ekosistemlere kadar görüntü algılama teknikleri (Bölüm 5.2’de açıklanan geniş alan uzaktan algılaması dahil) ile elde edilmiş fitobiyolojik bilginin kullanılması gerekmektedir. Bu bilgi çiftlik yönetiminde iyileştirmeler, çiftçiler ve araştırmacıların eğitiminde kullanılabilir. Ayrıca bitki mühendisliği, seralar ve hassas tarımda kullanılacak makine ve kontrol sistemlerinin yeteneklerinin geliştirilmesi için de kullanılabilir. Uzaktan algılama verileri kullanan model analizinin sonuçları, tarımsal ormancılık planlama için bir rehberlik sağlayabilir. Bu bilgiler ile genetik bilginin birleştirilmesi, genetik tarama ve çevresel biyogözleme alanlarında faydalı olabilir.

Kaynaklar

1. Hashimoto, Y., G. P. A. Bot, W. Day, H.-J. Tantau, and H. Nonami, eds. 1993. *The Computerized Greenhouse*. San Diego, CA: Academic Press.
2. King, R. E., and N. Sigrims, eds. 2001. Special issue on computational intelligence in crop production. *Comput. Electr. Agr.* 31(1).
3. De Baerdemaeker, J., A. Munack, H. Ramon, and H. Speckmann. 2001. Mechatronic systems, communication, and control in precision agriculture. *IEEE Contr. Syst. Mag.* 21: 48-70.

4. Hashimoto, Y. 1989. Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. *Acta Hortic.* 260: 115-121.
5. Dixon, J., and M. McCann, eds. 1997. *Precision Agriculture in the 21st Century*. Washington, D.C.: National Academy Press.
6. Hegg, R. 1999. Sustainable and environmental engineering. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Vol. III, eds. B. A. Stout, and B. Cheze, 585-598. St. Joseph, MI: ASAE.
7. Auernhammer, H., and J. K. Schueller. 1999. Precision farming. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Vol. III, eds. B. A. Stout, and B. Cheze, 598-616. St. Joseph, MI: ASAE.
8. Myers, V. I. 1983. Remote sensing applications in agriculture. *Manual of Remote Sensing*, 2nd ed., Vol. II, ed. R. N. Colwell, 2111-2228. VA: Amer. Soc. Photogrammetry.
9. Omasa, K., and I. Aiga. 1987. Environmental measurement: Image instrumentation for evaluating pollution effects on plants. *Systems and Control Encyclopedia*, ed. M. G. Singh, 1516-1522. Oxford, UK: Pergamon Press.
10. Omasa, K. 1990. Image instrumentation methods of plant analysis. *Modern Methods of Plant Analysis*, eds. H. F. Linskens, and J. F. Jackson, 203-243. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
11. Kondo, N., and K. C. Ting, eds. 1998. *Robotics for Bioproduction Systems*. St. Joseph, MI: ASAE.
12. Ben-Dor E., J. R. Irons, and G. F. Epema. 1999. Soil reflectance. *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, 3rd ed., Vol.3, ed. A. N. Rencz, 111-188. New York, NY: John Wiley and Sons.
13. Hashimoto, Y., H. Murase, T. Morimoto, and T. Torii. 2001. Intelligent system for agriculture in Japan. *IEEE Contr. Syst. Mag.* 21(5): 71-85.
14. Hashimoto, Y., T. Ino, P. J. Kramer, A. W. Naylor, and B. R. Strain. 1984. Dynamic analysis of water stress of sunflower leaves by means of a thermal image processing system. *Plant Physiol.* 76: 266-269.
15. Omasa, K., and J. G. Croxdale. 1992. Image analysis of stomatal movements and gas exchange. *Image Analysis in Biology*, ed. D. P. Häder, 171-197. Boca Raton, FL: CRC Press.
16. Jones, H. G. 1999. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surface. *Plant Cell Environ.* 22: 1043-1055.
17. Omasa, K. 2002. Diagnosis of stomatal response and gas exchange of trees by thermal remote sensing. *Air Pollution and Plant Biotechnology*, eds. K. Omasa, H. Saji, S. Youssefian, and N. Kondo, 343-359. Tokyo, Japan: Springer-Verlag.
18. Lichtenthaler, H. K., ed. 1996. Vegetation stress. *Special Issue: J. Plant Physiol.* 148: 599-644.
19. Kim, M. S., C. L. Mulchi, J. E. McMurtrey, C. S. T. Daughtry, and E. M. Chappelle. 2002. Assessment of environmental plant stresses using multispectral steady-state fluorescence imagery. *Air Pollution and Plant Biotechnology*, eds. K. Omasa, H. Saji, S. Youssefian, and N. Kondo, 321-341. Tokyo, Japan: Springer-Verlag.
20. Govindjee, J. A., and L. Nedbal. 2000. The chlorophyll fluorescence imaging and its application in plant science and technology. *Photosynthetica* 38: 481-482.
21. Omasa, K., and K. Takayama. 2002. Image instrumentation of chlorophyll *a* fluorescence for diagnosing photosynthetic injury. *Air Pollution and Plant Biotechnology*, eds. K. Omasa, H. Saji, S. Youssefian, and N. Kondo, 287-308. Tokyo, Japan: Springer-Verlag.
22. Suk, M., and S. M. Bhandarkar. 1992. *Three-dimensional Object Recognition from Range Images*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.

23. Russ, J. C. 1995. *The Image Processing Handbook*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
24. Omasa, K., Y. Akiyama, Y. Ishigami, and K. Yoshimi. 2000. 3D remote sensing of woody canopy heights using a scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.* 20: 394-406.
25. Omasa, K., Y. Urano, H. Oguma, and Y. Fujinuma. 2002. Mapping of tree position of *Larix leptolepis* woods and estimation of diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.* 22: 550-557.
26. Rigaut, J. P., S. Carvajal-Gonzales, and J. Vassy. 1992. Confocal image cytometry-quantitative analysis of three-dimensional images obtained by confocal scanning microscopy. *Image Analysis in Biology*, ed. D. P. Häder, 109- 133. Boca Raton, FL: CRC Press.
27. Gu, M. 1996. *Principles of Three Dimensional Imaging in Confocal Microscopes*. River Edge, NJ: World Scientific.
28. Kramer, P. J., and J. S. Boyer. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*, 162- 164, 244-245. San Diego, CA: Academic Press.
29. Omasa, K. 2000. 3D color video microscopy. *Image Analysis: Methods and Applications*, 2nd ed., ed. D. P. Häder, 257-273. Boca Raton, FL: CRC Press.
30. Wessman, C. A. 1990. Evaluation of canopy biochemistry. *Remote Sensing of Biosphere Functioning*, eds. R. J. Hobbs, and H. A. Mooney, 135-156. New York, NY: Springer-Verlag.
31. Ustin, S. L., M. O. Smith, S. Jacquemound, M. Verstraete, and Y. Govaerts. 1999. Geobotany: Vegetation mapping for earth sciences. *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, 3rd ed., Vol.3, ed. A. N. Rencz, 189- 248. New York, NY: John Wiley and Sons.
32. Fujino, M., R. Endo, and K. Omasa. 2002. Nondestructive instrumentation of water-stressed cucumber leaves—Comparison between changes in spectral reflectance, stomatal conductance, PSII Yield and shape. *Agr. Inform. Res.* 11: 161-170.
33. Chappelle, E. W., M. S. Kim, and J. E. McMurtrey, III. 1992. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sens. Environ.* 39: 239-247.
34. Hunt, Jr. E. R., and B. N. Rock. 1989. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.* 30: 43-54.
35. Bowman, W. D. 1989. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sens. Environ.* 30: 249-255.
36. Inoue, Y., S. Morinaga, and M. Shibayama. 1993. Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Jpn. J. Crop Sci.* 62: 462-469.
37. Running, S. W. 1990. Estimating terrestrial primary productivity by combining remote sensing and ecosystem simulation. *Remote Sensing of Biosphere Functioning*, eds. R. J. Hobbs, and H. A. Mooney, 65-86. New York, NY: Springer-Verlag.
38. Lang, M., F. Stober, and H. K. Lichtenthaler. 1991. Fluorescence emission spectra of plant leaves and plant constituents. *Radiat. Environ. Bioph.* 30: 333- 347.
39. Buschmann, C., G. Langsdorf, and H. K. Lichtenthaler. 2000. Imaging of the blue, green, and red fluorescence emission of plants: An overview. *Photosynthetica.* 38: 483-491.
40. Krause, G. H., and E. Weis. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 313-349.
41. Govindjee, J. A. 1995. Sixty-three years since Kautsky: Chlorophyll *a* fluorescence. *Aust. J. Plant Physiol.* 22: 131-160.

42. Omasa, K., K. Shimazaki, I. Aiga, W. Larcher, and M. Onoe. 1987. Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiol.* 84: 748-752.
43. Daley, P. F., K. Raschke, J. T. Ball, and J. A. Berry. 1989. Topography of photosynthetic activity in leaves obtained from video images of chlorophyll fluorescence. *Plant Physiol.* 90: 1233-1238.
44. Omasa, K., S. Maruyama, M. A. Matthews, and J. S. Boyer. 1991. Image diagnosis of photosynthesis in water-deficit plants. *IFAC Workshop Ser., 1991 No.1*, 383-388. Oxford, UK: Pergamon Press.
45. Omasa, K. 1998. Image instrumentation of chlorophyll *a* fluorescence. *SPIE* 3382: 91-99.
46. Rolfe, S. A., and J. D. Scholes. 1995. Quantitative imaging of chlorophyll fluorescence. *New Phytol.* 131: 9-79.
47. Siebke, K., and E. Weis. 1995. Assimilation images of leaves of *Glechoma hederacea*: Analysis of non-synchronous stomata related oscillations. *Planta.* 196: 155-165.
48. Osmond, C. B., P. F. Daley, M. R. Badger, and U. Lüttge. 1998. Chlorophyll fluorescence quenching during photosynthetic induction in leaves of *Abutilon striatum* Dicks, infected with abutilon mosaic virus, observed with a fieldportable imaging system. *Bot. Acta.* 111: 390-397.
49. Takayama, K., E. Goto, and K. Omasa. 2000. Diagnosis of photosynthetic injury caused by agricultural chemicals using chlorophyll fluorescence imaging. *Proc. XIV Memorial CIGR World Congress 2000*, 1436-1441.
50. Croxdale, J. G., and K. Omasa. 1990. Chlorophyll *a* fluorescence and carbon assimilation in developing leaves of light-grown cucumber. *Plant Physiol.* 93: 1078-1082.
51. Croxdale, J. G., and K. Omasa. 1990. Patterns of chlorophyll fluorescence kinetics in relation to growth and expansion in cucumber leaves. *Plant Physiol.* 93: 1083-1088.
52. Omasa, K. 1992. Image diagnosis of photosynthesis in cultured tissues. *Acta Hortic.* 319: 653-658.
53. Daley, P. F. 1995. Chlorophyll fluorescence analysis and imaging in plant stress and disease. *Can. J. Plant Physiol.* 17: 167-177.
54. Monteith, J. L. 1973. *Principles of Environmental Physics*. London, UK: Edward Arnold.
55. Jones, H. G. 1992. *Plants and Microclimate*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
56. Omasa, K., F. Abo, Y. Hashimoto, and I. Aiga. 1980. Measurement of the thermal pattern of plant leaves under fumigation with air pollutant. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn.* 11: 239-247.
57. Horler, D. N. H., J. Barber, and A. R. Barringer. 1980. Effects of cadmium and copper treatments and water stress on the thermal emission from peas (*Pisium sativum* L.): Controlled environment experiments. *Remote Sens. Environ.* 10: 191-199.
58. Inoue, Y., B. A. Kimball, R. D. Jackson, P. J. Pinter Jr., and R. J. Reginato. 1990. Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. *Agr. Forest Meteorol.* 51: 21-33.
59. Omasa, K., Y. Hashimoto, and I. Aiga. 1981. A quantitative analysis of the relationships between SO₂ or NO₂ sorption and their acute effects on plant leaves using image instrumentation. *Environ. Control Biol.* 19: 59-67.
60. Omasa, K., Y. Hashimoto, and I. Aiga. 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.
61. Omasa, K., and R. Funada. 1996. Image instrumentation of living plants. *BioSci. and Industry* 54: 545-546, 569-571.

62. Onoe, M., J. W. Tsao, H. Yamada, H. Nakamura, J. Kogure, H. Kawamura, and M. Yoshimatsu. 1983. Computed tomography for measuring annual rings of a live tree. *Proc. IEEE* 71: 907-908.