

第一次産業におけるマシンビジョンの現状と将来

近藤 直^{†1}

本報告は第一次産業（特に農業、林業、畜産業、水産業等）で実際に用いられているマシンビジョンシステムの現状を述べると共に、研究状況についても概略を述べる。農業においては、ほ場管理、苗生産、収穫、選別等の作業について、畜産業、水産業においては肉牛や魚の個体管理について紹介する。さらには画像から得られる情報の活用方法についても言及する。

Present Situation and Future Prospects on Machine Vision Technologies in Primary Industry

NAOSHI KONDO^{†1}

Machine vision technologies are already spread in the primary industry especially for agricultural product production and monitoring biological materials and their environments. In this manuscript, examples of machine vision systems in agriculture, livestock, and aquaculture are introduced, while a couple of on-going researches are described. Information from the acquired images are so important that it would be used for farming guidance and traceability for safety and security.

1. はじめに

近年の TV カメラの普及にはめざましいものがあり、第一次産業においても実際の現場で用いられるようになった。ここでは、それらの紹介を行うと共に、現在進行中の研究も含めて述べることにし、将来のマシンビジョン技術の導入可能性を展望する。

第一次産業でマシンビジョンの対象となるものは、自然界あるいは、ほ場、グリーンハウス、施設等における生物であることが多い。生物は多種多様でそれぞれが独自の反射特性を有するだけでなく、発光物質による光、構造的特徴による発色を示すものも少なくない。そこで、本章では画像取得の際に、基礎情報となる反射特性を最初に示しておく。

図1に数種の果実、茎葉、花卉の分光反射特性を示す[1][2]。これより、可視領域ではそれぞれの部位の色を示し、400 nm から 500 nm および 680 nm 付近でクロロフィル吸収帯が顕著な特徴を示していることがわかる。近赤外領域では反射率が急激に上昇すると同時に、970 nm, 1170 nm, 1450 nm, 1950 nm 付近で水の吸収帯が確認できる。一方、紫外領域では花卉のみが高い反射率を示し、昆虫との共進化の結果が伺える。

図2および図3には、肉および昆虫の分光反射特性を示す[1]。これより、肉類は植物に類似しているものの、脂肪

の影響で吸収帯が多く観察され、紫外領域でも異なる反射率を示す。昆虫においては、ハネを有することより、異なった反射率を示すものの、カマキリやショウリョウバッタのように、外敵から身を守るため、保護色として茎葉と非常に似た反射率を示すものもある。

魚においては鱗が構造色を示すものも多いが、図4のように反射率そのものが部位によって異なる。特に、外敵から自己防衛するため、上方および下方から見たときの反射率が大きく異なる（上方からは海の色に似せて黒っぽく、下方からは太陽の光に同化するよう明るい）と同時に、食肉と同様に紫外領域の反射率が高い。また、図5のように土壌は含水率によって異なる反射率を示す。

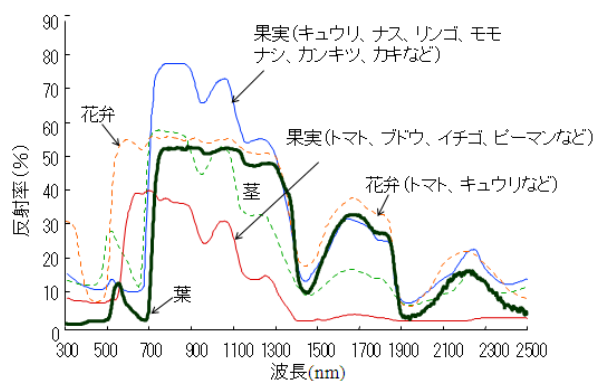


図1 植物の分光反射特性[1][2]

Figure 1 Spectral Reflectance of Plants.

^{†1} 京都大学
Kyoto University.

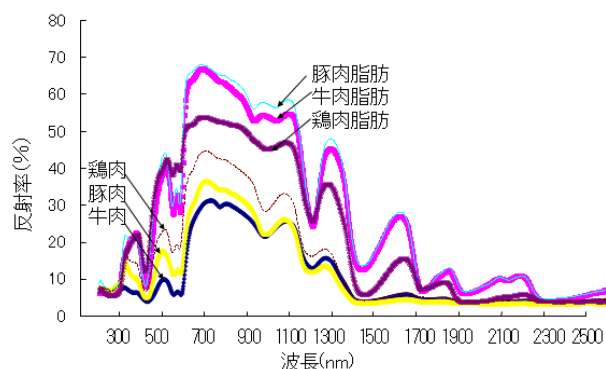


図2 豚肉、牛肉、鶏肉の分光反射特性[1]
Figure2 Spectral Reflectance of Meats.

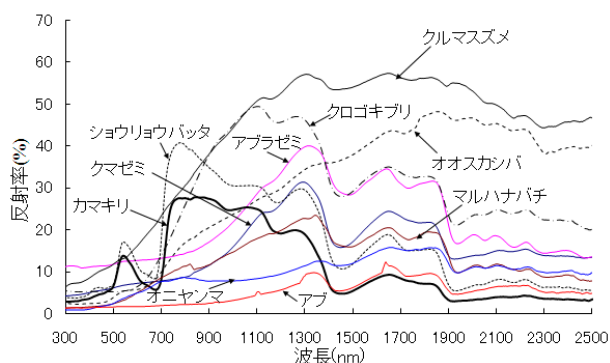


図3 昆虫の分光反射特性[1]
Figure3 Spectral Reflectance of Insects.

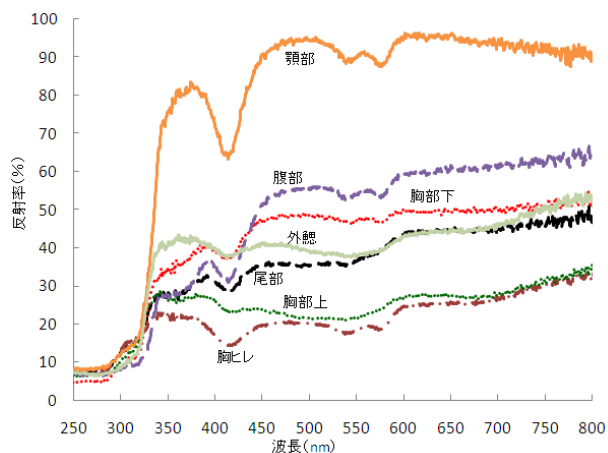


図4 魚（マダイ）の各部位の分光反射特性[3]
Figure4 Spectral Reflectance of a Fish (Sea Bream).

さらに、植物の場合は表皮にクチクラ層という農作物特有の保護層がある。図6に示すように、外側からクチクラ層、表皮細胞、柔組織細胞となっており、根部以外の植物の部位にはクチクラ層がある。クチクラとは、細胞壁の外側にクチン（不飽和脂肪酸の重合物質）とワックス（高級脂肪酸と高級アルコールのエステル化合物）でできた透明で水を通さない層[4]である。葉、茎、果実、種子の表面が水をはじくのは、この層のためで、体内への水の侵入および水分蒸発を防ぐという大切な役割を果たしている。クチク

ラは雨などにより少しずつ損失したり、乾燥する季節には発達すると言われており、果実の新鮮さと光沢とは関係がみられる。ただし、ナスのように新鮮であっても光沢のない果皮は、内部品質の低下している場合（ボケナス）もあるので、この光沢の程度も重要な情報である。ただし、このクチクラ層のために、植物体表面で発生する鏡面反射により、周囲の映り込みやハレーション等によって対象物の情報が失われることがあるので注意を要する。

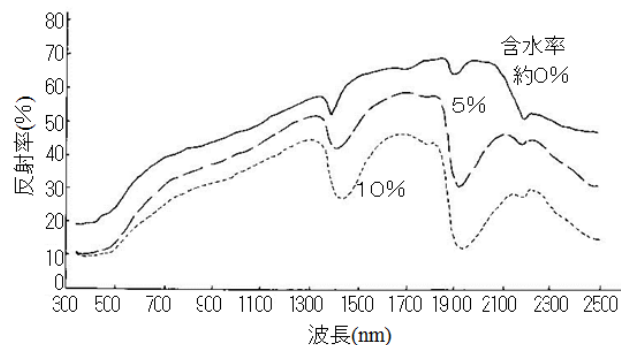


図5 土壌の分光反射特性[1]
Figure5 Spectral Reflectance of Soil.

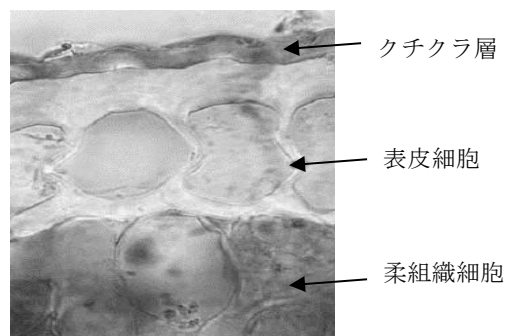


図6 代表的な植物表皮[1]
Figure6 Plant Surface Structure.

2. 農産物選別

農作業は、ほ場管理から始まり、苗生産、栽培管理、収穫、選別、出荷等を行うことが一般的である。その中でも、マシンビジョンが最も多く利用されているのは選別作業である。図7にローラーピンコンベアを利用した果実選別システムの例[5]を示す。このシステムではコンテナの果実を1個ずつコンベア上で切り離した後、X線画像1枚ならびにカラー画像6枚を果実ごとに入力する。これらの画像により、個々の果実の寸法、色、形状、欠陥および内部品質を評価する。果実を搬送するコンベア速度は1 m/s程度であることが多く、果実同士の距離が15 cmから20 cmであるとすると、1秒間に5個の果実が処理される。

以前は照明装置として演色性の高いハロゲンランプを用いることが多かったが、最近はメンテナンス性およびエネルギー消費量の点から有利であるLEDを用いることが

多い。カメラには VGA クラスの解像度のカラーカメラが一般に用いられているが、微小な表皮の損傷検出のために高解像度のもの、倍速カメラなどを用いることが増えてきた。さらに近年、果皮に含まれる蛍光物質を利用した装置も実用化された。図 8 は、白色 LED と UVLED (365 nm 付近) を連続的に照射し、1 個の果実からカラー画像と蛍光画像を得るシステムである[6][7]。蛍光画像は、特に正常部位と色等の違いの少ない水腐れや微小なキズに対して効果がある。図 9 には、水腐れしたイヨカンのカラー画像と蛍光画像を示す。多くのカンキツにおいて、カラー画像では識別困難な欠陥もこの方法で検出可能である[8, 9]。

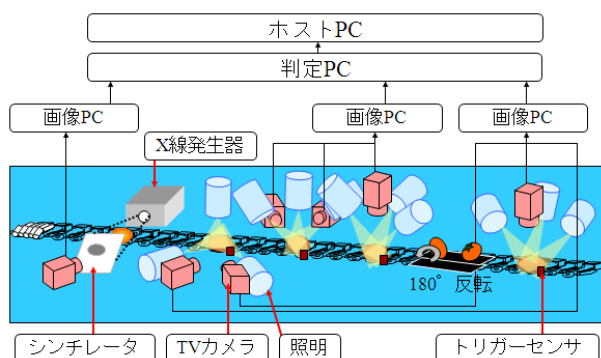


図 7 果実選別システムの例[3]

Figure7 A Fruit Grading System with Machine Vision

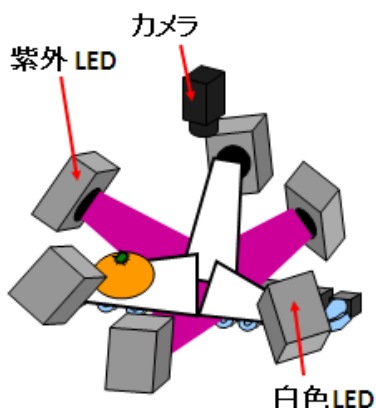


図 8 白色および紫外光を用いたマシンビジョンの例

Figure8 A Double LED Machine Vision System

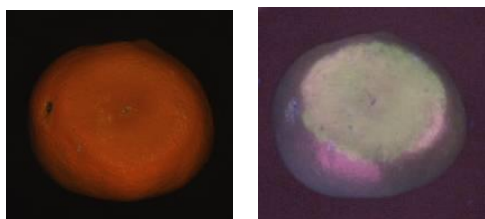


図 9 水腐れしたイヨカンのカラー画像（左）と蛍光画像（右）[2]

Figure9 Color and Fluorescence Images of A Rotten Fruit.

このようなマシンビジョンシステムはカンキツの共同

選果施設の場合、1 ライン当たり 6 台程度導入され、国内には 1100 ライン以上が導入されていると言われる。さらに、リンゴ、ナシ、モモなどの果実はもとより、ナス、キュウリ、ジャガイモ、ネギなどの野菜の選別施設にも用いられていることより、果実選別システムに用いられている国内のマシンビジョン装置は 10,000 を超えていると見られる。数年前に韓国でも同様の選別システムが大規模に導入され、現在は中国に導入されつつある。

3. 果実収穫

果実収穫ロボットが研究[10]されはじめてから 30 年が経過した。マニピュレータを利用した果実収穫ロボットは研究段階で実用化に今一步のところでとどまっているが、そのキーテクノロジーの一つはマシンビジョンである。ここでは簡単に、イチゴ収穫ロボット[1]で利用されている画像を紹介する。

図 10 に高設栽培用イチゴをステレオビジョンで入力した後、果実と茎葉の色値の差に基づいて 2 値化した画像を示す。これより、左のカメラの果実 1 が右では視野外となり、マッチングできず、距離計測ができない。また、果実 3, 4 は果柄および手前の未熟な果実に隠されており、2 値画像での形状が異なっている。このことより、完全にマッチング可能で 3 次元位置計測可能であるのは、2, 5, および 6 の 3 個の果実のみであった。

さらに、果実収穫時には果柄を切断するため、果柄の正確な位置検出も必要となる。ただし、果柄径が 1 mm 以内のものも多く、ステレオビジョンのように離れた地点からの画像入力では十分な解像度が得られない。そのため、エンドエフェクタ付近に 3 台目のカメラを装着し、マニピュレータが果実に接近してから画像入力を行い、目的果実の果柄を認識するアルゴリズムとなっている[3][11]。イチゴ果実は果房で生育することより、季節によっては未熟な果実や果柄によって成熟果が隠されることも多く、正確な果実検出は容易でない。

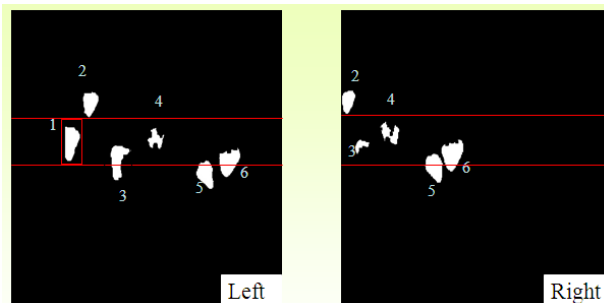


図 10 イチゴ果実の 2 値画像

Figure10 Binary Images of Strawberry Fruits

4. 農作物のモニタリング

グリーンハウス等における農作物の管理のため、色や形状等による対象物の抽出あるいは識別を行い、

種々の特徴量を得た後、対象物の種類、状態、方向、異常の有無などを知る必要がある場合も少なくない。その際にも画像情報はよく用いられるが、その認識や理解においては、対象物に関わる知識を知った上でアルゴリズムを構築したり、対象物のデータベースに基づいて認識をすることが必要になる。これは品目、品種によって異なる情報であり、植物の場合、茎葉、果実、花卉の色、形状、寸法、さらには葉序等の特徴をまず知ることである。

たとえば生育中のトマトの認識を行う場合、植物としてのトマトの情報を多く有することが画像理解を早める。トマトは小葉が集まって本葉を形成しており、その本葉は図11（左）のように十字互生葉序と呼ばれる出葉形態を示す。つまり、主茎から1枚目の本葉がある方向に出た後、2枚目は1枚目を基準に、3枚目は2枚目を基準に90°回転した方向から出葉する。次の90°方向には花房（果房）が、さらに次の90°方向からは再び本葉が出葉することを繰り返す。これを3次元的なモデルとして作成し、視点を変えて2次元に投影したパターンを有することで、画像認識は容易になることも多い。もちろん、茎葉はたわみ、ねじれ、落葉等によって、より複雑な形態を示すが、このような規則性を持っている[1]。

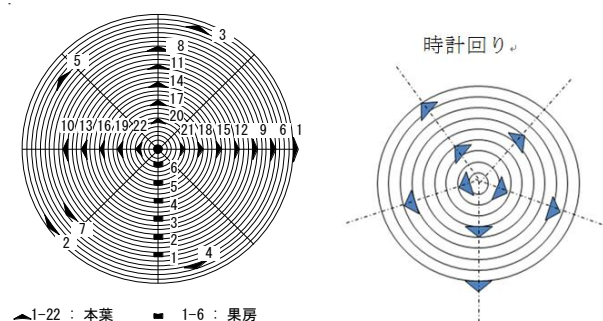


図11 トマト（左）とキュウリ（右）の葉序[1][2]
Figure11 Phyllotaxis of Tomato Plant (Left) and Cucumber Plant (Right)



図12 立毛中のキュウリの画像[12]
Figure12 Images of Growing Plant and Main Stem

キュウリは2/5葉序と言われ、主茎から葉が5枚出る間に2回転する（図11（右））。つまり、隣り合う葉柄の角度は144°となっており、さらにその出葉方向には時計回り、反時計回りがあることが知られている。これらの作物は畝等に整列して生育させるため、幾何学的に投影モデルを作成することも可能と考えられる。

図12（左）のような立毛中のキュウリに対しては、2値画像（中）を基にして図中右のように主茎を認識する。葉位の認識は、草丈と節数の関係、節位と節間長の関係、節位と側枝長の関係、側枝長と葉柄長の関係、本葉の開度、主茎と側枝のなす角度、葉柄と葉身のなす角度の七つの生長ルールを用い、存在確率で表す投影モデルを作成する方法が試みられている[12][13]。

この他、植物を認識する手法として、チェーンコードや輪郭線追跡による形状認識方法[14][15]、パターン認識アルゴリズム[16]、FFT等による形状解析[17]、ファジィやニューラルネットワークを用いた認識[18]など、種々の研究および実用化になった装置の中で用いられている。また、種々の管理作業のため、ほ場に生育中の大豆などの3次元画像を求める[19]ことも行われている。これは、トラクタに装着したステレオビジョンからの画像を基にエリアベースマッピングを行うことでリアルタイムに得られている。

5. 木材加工

木材の生産は、一般に以下のように行われる。まず、原料（原木）を各地から搬入し、その皮を剥ぐ。次に、原木の外側の状態をよく観察して、最も効率的な寸法の製品を採ることが可能な木取り法を決定して四角く製材する。続いて乾燥ならびに養生した後、鉋掛けして所定寸法に仕上げる。さらに、含水率、ヤング率を計測して基準値をクリアしたものだけを出荷する。



図13 乾燥後の木材の反りと年輪[2]
Figure13 Wood Warpage and Annual Growth Ring

製材後、乾燥する前に木材の年輪から、裏表（内外）を判定する必要がある。年輪が古いものが外側であり、外側

を外側に上に配置されるように、はい積される。その理由としては、通常乾燥後は図13のように木材が反るため、鉋掛けするときの安定が良くなること、乾燥後全ての木材をその方法で並べておくと、反りも最小限に押さえられること、ラミナー材を製作するときに、裏表が既知であると便利であることなどがあげられる。その検査部にマシンビジョンが用いられ、年輪の検査する。木材の搬送速度は60～90m/minで、毎秒3本の処理が可能である[3][20]。

6. リモートセンシング

植物の生育状態を観測できる車載センサ、衛星、ヘリコプタを使用したリモートセンシングが注目されており、土壌の種類、葉中の窒素含量、作物の収量、冷害の発生状況、登熟程度などが調査されている。図14は、衛星画像の1つである SPOT 画像から植生指数を計算した結果を等高線図に重ね合わせたものである。これより、地域のコメのタンパク含量が評価可能となり、品質が推定できる[1]。

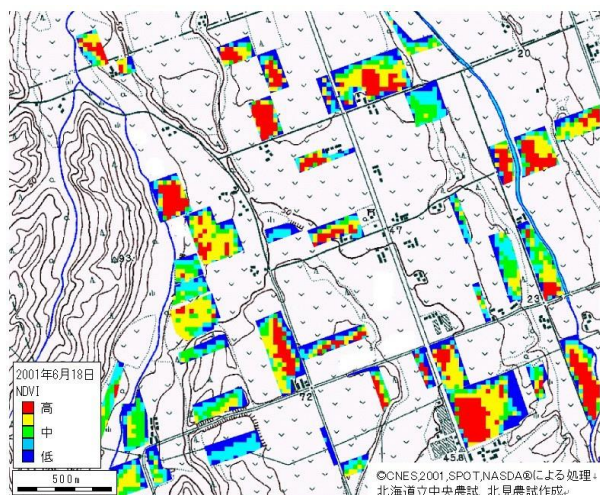


図14 植生指数によるコメのタンパク質含量推定 (SPOT 画像, 北海道立農業試験場, 北見農試) [1]

Figure14 Prediction of Protein Content of Rice Grains in Paddy Fields



図15 移動中の土壌センサによる入力画像例
(東京農工大 澁澤教授提供)

Figure15 Examples of Images from a Soil Sensor

7. ほ場管理

ほ場管理作業において重要なことは、栽培前の土壌の状態を調査し、その結果に基づき施肥、灌水等の作業を行うことである。土壌の肥沃度を計測するために土壌センサ[21]が開発されており、センサ中のカメラを用いた研究[22]がなされている。図15には実際に土壌センサで入力された耕盤付近の画像を示す。これにより、色およびテクスチャの違いが計測可能である。

8. 肉牛の血中ビタミンAの推定

高品質な牛肉を生産するためには、肥育中の血中ビタミンAのコントロールが必要とされる。しかしながら、ビタミンAを30IU/dl以下に下げると、ビタミンA欠乏症に陥ることがある。そこで、正確なビタミンAの計測には血液採取が行われることもあるが、労働力および金銭的に大きな負担になること、牛にかかるストレスもあることなどの理由より一般的には経験と勘で行われている。文献[23]によると、ビタミンAと牛の目とは関係があることより、現在、マシンビジョンを用いたビタミンAの推定に関わる研究が進行中である[24]。図16には、肉牛の瞳孔画像の例を示す。



図16 肉牛の瞳孔画像の例

Figure16 An Image of Beef Cattle Eye

図17には、水飲み場に装着した瞳孔の自動計測装置である。肉牛の取水時に瞳孔画像を入力し、色、光反射強度、瞳孔収縮スピード等と血中ビタミンAとの相関を求め、今後、その結果を基に多変量解析等により、正確に予測することが期待される。

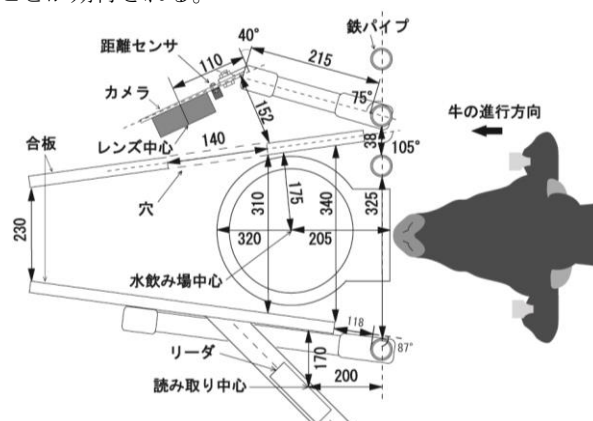


図17 肉牛の瞳孔画像自動入力装置[25]

Figure17 Automatic Image Acquisition Device for Beef Cattle Eye

9. 生魚のモニタリング

タイやハマチ、さらには近年ではマグロに至るまで沿岸の生簀を用いて成魚まで養育されている。既に生簀内で成育中の魚体の寸法、尾数等を計測するためのカメラも市販されており、オーストラリア等ではその利用が試みられている[26]。今後、個体管理、精密養魚が進められる中で、画像による計測は大きな情報源となると予測される。

10. おわりに

ここまで第一次産業でのマシンビジョンの利用について研究動向も含めて述べてきた。このほかにもマシンビジョンは食品加工施設等でも検査等に用いられており、今後も対象物、屋内外を問わず、利用は増えるものと考えている。マシンビジョンは、正しい画像取得に関わる知識で使用するれば安価で簡便なであることより、特に、開発途上国において、利用されると予測している。

近年、これらの画像から得られた情報はデータベースに毎年蓄積されるようになった地域も多い。そのデータはGIS上に展開され、地域の営農指導に用いている農協、生産者も多い。本稿では、可視領域の画像について述べたが、近赤外や紫外、X線のように人間の目に見えない領域の画像、移動速度の速い物体の画像、夜間の画像等情報も食の安心安全を維持するには必要不可欠である。これらの情報データベースは、食品のトレーサビリティにも用いられている。

謝辞 本文中で紹介した記事には、多くの研究機関、企業からの貴重なデータ、図、写真等が含まれている。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 近藤直他：農業ロボット (I) -基礎と理論-, コロナ社(2004)
- 2) 近藤直：分光反射特性を利用した植物体各部の識別のための波長帯域の選定, 生物環境調節 26(4), 175-183(1988).
- 3) 近藤 直：農林水産分野のマシンビジョンを展望する, ViEW2009 ビジョン技術の実利用ワークショップ「膨張する画像技術の新展開」講演要旨, 精密工学会(2009)
- 4) 矢澤進：図説野菜新書, 朝倉書店, 83-84(2003)
- 5) Njoroge, J, et al.: Automated Fruit Grading System using Image Processing. Proceedings of SICE annual conference 2002 in Osaka, MP18-3 on CD-ROM. (2002)
- 6) Kondo, N. et al.: Identification of Fluorescent Substance in Mandarin Orange Skin for Machine vision system to detect Rotten Citrus Fruits, EAEF, 2(2), 54-59(2009).
- 7) Kurita, M., et al.: A double image acquisition system with visible and UV LEDs for citrus fruit, Journal of Robotics and Mechatronics, 21(4):533-540(2009)
- 8) MOMIN, M.A., et al.: Patterns of Fluorescence Associated with Citrus Peel Defects, EAEF 6(2): 54-60 (2013)
- 9) MOMIN, M. A, et al.: Identification of UV-Fluorescence Components for Detecting Peel Defects of Lemon and Yuzu Using Machine Vision, EAEF 6(4): 165-171 (2013)
- 10) 川村登他：農業ロボットの研究 (第1報), 農業機械学会誌

46(3), 353-358(1984)

- 11) RAJENDRA, P. et al.: Machine Vision Algorithm for Robots to Harvest Strawberries in Tabletop Culture Greenhouses, EAEF 2(1), 24-30 (2009).
- 12) 西卓郎他：キュウリの画像認識に関する研究 (第1報) 農業機械学会誌 59(5), 45-53(1997)
- 13) 西卓郎他：キュウリの画像認識に関する研究 (第2報), 農業機械学会誌 59(6), 65-73(1997)
- 14) 近藤直他：キクの挿し木作業の自動化に関する基礎的研究 (第1報), 農業機械学会誌 60(2), 67-74(1998).
- 15) 近藤直他：キクの挿し木作業の自動化に関する基礎的研究 (第2報), 農業機械学会誌 60(3), 63-70(1998).
- 16) 西脇建太郎他：テンプレートマッチングを使用した水稻株位置推定アルゴリズム, 東北農研センタ
http://www.affrc.go.jp/ja/db/seika/data_tohoku/h13/tohoku01048.html
- 17) グエン・ハオ他：農産物形状の解析について, 農業機械学会誌 41(2), pp.305-308(1979)
- 18) 甲斐和広他：スプレーギクの花房フォーメーションの評価アルゴリズムに関する研究 (第3報), 生物環境調節 34(2), 123-128(1996)
- 19) Kise M., et al.: A Stereovision-based Crop Row Detection Method for Tractor-automated Guidance, Biosystems Engineering, 90(5) 357-367 (2005).
- 20) 近藤直他：農業ロボット(II)-機構と事例-, コロナ社(2006)
- 21) Shibusawa, S., et al.: Soil Mapping Strategy Using real-Time Soil Spectrophotometer, *Proc. (on CD-ROM) 6th International Conference on Precision Agriculture, Minnesota, USA.*(2002)
- 22) ROY, S.K., et al.: Characterization of Fertilizer and Manure Stressed Soil Images with Textural Analysis Using Real-time Soil Spectrophotometer, *Proc. (on CD-ROM) 8th International Conference on Precision Agriculture, Minnesota, USA.*(2004)
- 23) 松田敬一：血中ビタミンA濃度の簡易推定法, 養牛の友, 393号, 52-225 (2008)
- 24) HAN, S., et al.: Estimation of Serum Vitamin A Level by Color Change of Pupil in Japanese Black Cattle. EAEF 6(4), 177-183 (2013)
- 25) 近藤 直：農畜水産業における生物センシングの利用：精密畜産, 精密養魚を目指して, 映像情報メディア学会誌, 2011年11月号(2011)
- 26) AQ1 SYSTEMS: AM-100 魚体測定ステレオカメラ,
<http://aq1systems.jp/am-100.html>, <http://www.aq1systems.com>