

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	LI NANDING
論文題目	Non-invasive Monitoring for Blood Vitamin A Levels in Japanese Black Cattle Based on Eye Surface and Fundus Image Analysis (眼の表面と眼底の画像分析に基づいた黒毛和牛の血中ビタミンA濃度の非侵襲モニタリング)		
(論文内容の要旨)			
<p>2050年までに96億人に達すると推定される世界人口の増加を考慮すると、今後益々食料需要が高まることが予想される。長い間、人類にとって良質なタンパク源として利用されてきた牛肉の消費量は年々増加しており、なかでも和牛市場は世界中で拡大している。黒毛和種における品質のパラメータとして、一般に霜降りの程度が挙げられるが、それは筋肉繊維間に広がる白い脂肪組織のことで、食味の嗜好性と正の相関があるとされている。そのため、日本食肉格付協会によって霜降りの程度を評価するために12段階のビーフマーブリングスタンダード (BMS) が定められており、BMSの数値が大きいほど筋肉内に細かい脂肪が増加し、結果として牛肉の品質が高くなるといった認証制度が採用されている。高いBMSスコアを持つ高品質な和牛を生産するためには、肥育中期の飼料中のカロテン量を減らし、血中ビタミンAを低くすることで筋肉内の細かな脂肪の沈着を誘発し、牛肉に霜降りを生じさせる方法がとられている。しかしこの方法は畜産農家の勘と経験に依存しており、過度な低ビタミンA状態は夜盲症等の疾病を引き起こすことから、精密な肥育管理が求められ、生産者の負担となっている。</p> <p>これまで、血中ビタミンA量と関連があるとされる眼底の色や涙液、瞳孔収縮速度、眼球の表面反射等に着目した研究が行われてきたが、生物の多様性や機器の扱いやすさ、さらには判定確度の面で課題が残されていた。そこで本研究では、自動で眼球表面と眼底の画像を取得できる固定および可搬カメラを開発し、多角的に血中ビタミンA量との相関を調査するとともに、それらのデータを多面的に解析することを試みた。さらにそれらのカメラを用い、ディープラーニングによる血中ビタミンA欠乏の予測を試みた。</p> <p>本論文は5章で構成され、第1章では背景を整理しつつ問題点について述べるとともに、研究目的を説明している。第2章では、牛舎の水飲み場に設置する眼球表面と眼底の両画像を自動で撮像可能な固定カメラおよびシステムを開発し、先行研究に倣ってビタミンA欠乏症の程度を推定した。その結果、先行研究と比較して瞳孔部分と背景の分離精度が56.6%から82%まで改善した。また、サポートベクターマシンによる分類の結果、眼表面のみの情報では76%の精度であったが、眼表面と眼底画像の両方を利用することで、88%の精度まで向上することを確認した。</p> <p>第3章では、前章で開発したシステムを利用し、取得した画像群から1頭あたり29個(18個の色彩特徴及び11個の瞳孔光反射による瞳孔の形態的応答)の特徴量を抽出して血中ビタミンA量を推定した。多変量解析の結果、予測された血中ビタミンA量の決定係数は0.78、2乗平均平方根誤差は5.97であった。この値は0.019 $\mu\text{g/mL}$のレチノール量に相当し、臨床的にも意味のある精度を得た。</p> <p>第4章では、ハンドヘルド形の可搬カメラを開発し、ディープラーニングアルゴリズムの一つであるYOLOv5を用いて血中ビタミンA欠乏の推定を試みた。眼底画像を取得して評価した結果、総合的な分類精度は、重症、中等症、軽症群で98%、83%、86%であ</p>			

った。さらに、LRP (Layer-Wise Relevance Propagation) を用いてヒートマップで強調された眼底画像の特定領域から手作業で抽出した色彩特徴による分類をYOLOの予測と比較した結果、この可搬カメラは眼底画像の撮影ができるだけでなく、牛舎内でリアルタイムに血中ビタミンA欠乏の程度を評価できる可能性を示唆した。

第5章では、本研究の結果を総括するとともに、今回開発した装置の技術的課題を整理しつつ本技術の今後の展望にも触れている。

注)論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 words で作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

黒毛和種は、高い脂肪交雑割合を持つ肉質を特徴とするブランド牛である。この脂肪交雑基準を高く保つには、肥育中期での血中ビタミンA量を制限する必要がある。本論文では、血中ビタミンAの量が眼の表面や眼底に現れることに着目し、多様な個体差を持つ肥育牛でも血中ビタミンAの欠乏程度を評価できるシステムを目指した。その結果、眼の表面と眼底の画像を同時に非侵襲で計測可能な装置を開発し、取得したデータから多面的かつ多角的な特徴量を抽出後、血中ビタミンA欠乏の程度を推定できた。評価すべき点は、以下のとおりである。

1. 牛を保定して計測する従来方式ではなく、牛舎の水飲み場に設置する眼球表面と眼底の両方の画像を自動で撮像可能なシステムを開発し、固定カメラで血中ビタミンA欠乏の程度を推定した結果、先行研究と比べ推定精度が56.6%から82%まで改善した。
2. さらに、サポートベクターマシンによる分類の結果、眼表面のみの情報では76%の精度であったが、眼底画像の情報も合わせて利用することで、88%の精度まで向上することを確認した。
3. 取得した画像群から1頭あたり29個(18個の色彩特徴及び11個の瞳孔光反射による瞳孔の形態的応答)の特徴量を抽出し、血中ビタミンA量を多変量解析で推定した結果、予測精度の決定係数は0.78、2乗平均平方根誤差は5.97(0.019 µg/mLのレチノール量に相当)と良好な成績を得た。
4. ハンドヘルド型の可搬カメラを開発し、YOLOv5を用いて血中ビタミンA欠乏の推定を行った結果、重症、中等症、軽症群で98%、83%、86%の分類精度が得られたことより、牛舎内でリアルタイムに血中ビタミンA欠乏の程度を評価できる可能性を示唆した。

以上のように、本研究は個体差が大きい肉牛に対して、多角的かつ多面的に侵襲性の低い計測手法で精度よく血中ビタミンAの欠乏程度が評価できることを示し、精密畜産に大きく貢献できることから、生物センシング工学、フィールドロボティクス、農業システム工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(農学)の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和6年1月18日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士(農学)の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降(学位授与日から3ヶ月以内)