

## 学位論文題名

## 繋ぎ飼いにおける搾乳ロボットシステムに関する研究

## 学位論文内容の要旨

酪農経営を他の土地利用型農業と大きく異なるものとしているのが、日常的農作業による時間的束縛の強さである。酪農経営にあつては365日搾乳作業がつきまとう。さらに酪農における就農者の減少と高齢化、担い手不足が深刻化する中、搾乳作業の超省力化と併せて頻回搾乳にともなう乳量増をねらいとして欧州や日本、北米など世界的に搾乳ロボットの導入が急速に進んでいる。しかし、こうした搾乳ロボットは放し飼いにおいて牛の自発的搾乳を前提としたものであるが、日本において基幹酪農家層である40～50頭規模経営では繋ぎ飼いが主体であり、この方式は今後もかなりの戸数で継続する飼養方式と推測される。また、これまでの搾乳ロボットは欧州の民間企業主体で研究開発が進められた経緯から、そのシステム設計のための基礎的数値や概念が明らかにされていない。そこで、本論文では繋ぎ飼いに向けた搾乳ロボット化技術開発に資するために、乳牛の乳房形態および牛体構造から求められる搾乳ロボット設計のための数値条件を提示するとともに、ロボット機械系とその制御系の構築手法を明らかにした。最終的に、開発した搾乳ロボットを用いて搾乳牛への適応性を検証した。研究の成果は以下のようにまとめられる。

## 1. ホルスタイン種泌乳牛の乳頭配置と経時的変動

繋ぎ飼い用搾乳ロボットの設計評価に向けて、産次と泌乳期に対する乳頭間距離の変動および搾乳後の時間経過にともなう日内変動について測定評価した。泌乳期の進行にともなう、初産牛においては後乳頭間距離の減少、また経産牛においては前乳頭間距離の広がり著しく生じ、これらに配慮したロボット機械系の設計と乳頭位置データベースの構築の必要性を認めた。また、産次に拘らず乳量が低下し各乳頭間距離が減少する泌乳後期、特に分娩8ヶ月以降においては、搾乳回数を減らすことで一定の乳頭間距離を確保してティートカップの自動装着率を高めるとともに1回当たりの搾乳量が増加すると考えられ、効率的なロボットの稼働が期待できる。こうした個々の牛の生理特性や形態特性に併せた搾乳作業計画の企画は、繋ぎ飼い用搾乳ロボットがその搾乳処理能力を向上させるための最も考慮すべき事項である。

## 2. 牛体構造から求められる機械系の作業域と基本機構の検討

ロボット機械系設計のための数値条件として、ホルスタイン種泌乳牛111頭を供試しての体尺測定結果からロボットの関節自由度構成、リンク長及び台座の設定位置を決定した。牛体とロボット機械系双方の安全性を確保するために、ロボット作業環境内の四肢や乳房等の配置から干渉あるいは衝突の可能性の低い部分を抽出し、作業に要する空間領域を明示した。この空間での作業を前提としたロボットの関節構成と軌道生成を提案した。ロボ

ットの標準作業域は、牛体軸上の坐骨端からの距離 380mm の点を中心とする 350×350mm 区画が 4 乳頭の存在領域とし、X-Y 平面内での運動特性を考慮して、ロボットの第 1, 第 2 及び第 3 アームリンク長をそれぞれ 400mm, 350mm 及び 200mm と設定した。

### 3. 繋ぎ飼い用搾乳ロボットとしてのシステム構成とタスク

繋ぎ飼い用搾乳ロボットは、牛体の動きを規制することなく機械系が常に牛に追従する必要がある。そこで考案した機械システムは、牛体の臀部および左右の腰角を物理的に捕捉して牛体と一体化して牛体の動きに追従する機構（牛体位置追従機構）をベースとし、本機構の右側に自動搾乳ユニットを連結することとした。ユニットはティートカップ保持アーム、平面内において 3 つの回転関節を有する多関節型ロボット、及びこれらの鉛直高さを調整する昇降軸から成る。ロボットの手先には空気圧グリッパを用いて、その直上には 10 組の透過型光電スイッチを組み込んだ、80×66mm 角の局所的乳頭位置センサを装備した。制御系はモーションコントローラ等を実装したパソコンベースで構築した。ロボットは予め構築した教示データに基づいて対象乳頭まで概略移動した後に、乳頭位置センサで各乳頭位置を精査する。センサ領域内に包囲した個別乳頭位置は各光軸の on-off 情報からリアルタイムで認識され、このセンサ情報から手先位置の制御を行うこととした。

### 4. 乳頭追従のための制御系とマニピュレータの操作能力

試作した多関節型ロボットについて、主に XY 平面内に限った追従運動制御系の設計概念と運動特性を定量化した。各関節の周波数応答法によって解析した結果、位置制御時の第 1, 2 及び 3 関節の固有周波数の実測値から各関節の位置ループ系の交差周波数を各々 0.7Hz, 0.9Hz および 0.9Hz, サンプリングタイムを 20ms と決定した。この結果、本システムは乳頭に対して実時間で追従可能であると判断した。また、XY 平面におけるロボットの運動学においては、第 3 関節を牛体軸に対して常に平行姿勢を維持することにより、手先位置から各関節変位を求める逆運動学問題は比較的容易に解き得ることを解析的に示した。これを踏まえて、ロボットの操作能力を検討した結果、80%以上の高い可操作度でティートカップ装着作業が可能であることを明らかにした。

### 5. カップ装着アルゴリズムとシステムとしての適応性

最終的なシステム構築として、ティートカップの装着・解放アルゴリズムを検討した。乳頭の微妙な傾斜や運動の多様性に対応して、ローカルセンサによる検出位置を原点とする XY 軸方向にリサージュ波形振動をロボット手先に与えながら上昇させ、その過程で真空を適用する方式を考案した。開発した搾乳ロボットシステムを用いて、搾乳牛 2 頭を供試して自動搾乳試験を実施した。その結果、牛体位置追従機構で牛体を確実に捕捉することによって、牛体に大きな動きがあってもロボット機械系と牛体の位置関係が概ね確保され、ロボット手先は予めティーチングで構築した乳頭位置データベースに基づいて乳頭位置までティートカップを誘導することができた。また、そこで生じた乳頭位置偏差に対してローカルセンサは実時間でカップ中心を乳頭位置に合わせる機能を果たした。牛体位置追従機構は受動的に牛体後軀を捕捉し、これと連結した自動搾乳ユニットは円滑に乳頭の動きに追従し、60 秒程度ですべてのティートカップの自動装着を達成することができた。装着過程でのミルクラインへの大気流入量をほぼ最小限に抑止することができた。これらの試験結果より、本ロボットシステムは実用的な搾乳システムであることを確認した。また、本システムが抱える問題点と今後の技術的課題、さらに将来的展望を論じた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 松 田 從 三  
副 査 教 授 伊 藤 和 彦  
副 査 教 授 端 俊 一  
副 査 教 授 近 藤 誠 司

## 学位論文題名

### 繋ぎ飼いにおける搾乳ロボットシステムに関する研究

本論文は図 52、表 13、引用文献 153 を含み、7 章からなる総頁数 141 の和文論文であり、別に 8 編の参考論文が添えられている。

酪農経営を、他の土地利用型農業と大きく異なる点としているのは、日常的農作業による時間的束縛の強さである。酪農経営にあっては 365 日搾乳作業がつきまとう。現在、酪農における就農者の減少と高齢化、担い手不足が深刻化する中、搾乳作業の超省力化と複数回の搾乳に伴う乳量増をねらいとして欧州や日本、北米など世界的に搾乳ロボットの導入が急速に進んでいる。しかし、これらはすべて放し飼いにおいて牛の自発的搾乳を前提とした機械システムであるが、日本においては繋ぎ飼いが主流であり、この方式は今後もかなりの戸数で継続する飼養方式と推測される。そこで、本論文では、繋ぎ飼いに特化した搾乳ロボット技術の確立に向けて、ロボット機構に求められる設計条件を提示するとともに、これをもとに試作したロボット機械系と制御手法を明らかにした。また、開発した搾乳ロボットシステムについて搾乳牛を供試してその適応性を検証したものである。

研究の背景を述べた第 1 章に続き、第 2 章では、搾乳ロボットの基本条件として、産次と泌乳期による乳頭間距離とその経時的変動の推移を論じている。特に、泌乳初期はその泌乳量と各乳頭間距離との関係より 3 回以上の頻回搾乳を、また泌乳後期分娩 8 ヶ月以降においては、搾乳回数を減らし 10~12 時間間隔の搾乳を実施することにより、一定の乳頭間距離を確保して乳頭へのティートカップの自動装着率を高めることができることを明らかにした。こうした牛個体ごとの生理特性や乳器特性に応じた搾乳作業計画は、繋ぎ飼用搾乳ロボットがその搾乳処理能力を向上させるための最も考慮すべき事項である。

第 3 章では、乳頭位置のばらつきや牛体各部位の寸法と位置に基づいて、ロボットの標準作業域を提示した。標準作業域については、牛体の任意の部位からの位置を示すとともに、その大きさは XY 平面において 350×350mm であるとした。これを条件とした場合の適正なロボットは、XY 平面 3 つの回転自由度を有する多関節型機構であり、またロボッ

トの第1・2及び3アームリンクの適正な長さは各々約400,350及び200mmと決定した。

第4章では、試作した搾乳ロボットについて、システム全体の構成とそれぞれの機能を検討した。繋ぎ飼い用搾乳ロボットは、牛体の動きを規制することなく、機械系が常に牛に追従する必要がある。そこで考案した機械システムは、牛体の臀部と左右の腰角を物理的に捕捉して牛体と一体化して牛体の動きに追従する機構（牛体位置追従機構）をベースとし、これにロボット機構を連結した。ロボットの手先には透過型光電素子を配列した局所的乳頭位置センサを装備した。制御系はモーションコントローラ等を実装したパソコンベースで構築した。ロボットは教示データに基づいて対象乳頭まで概略移動した後に、センサで各乳頭位置を精査する。センサ領域に包囲した乳頭は各光軸の on-off 情報から実時間で認識され、この情報から手先位置の制御が行われる。

第5章では、試作したロボットについて主にXY平面での追従運動特性を定量化した。各関節の周波数応答法によって解析した結果、各関節の交差周波数は0.7~0.9Hzであり、サンプリングタイムを20msと決定した。この結果、本システムは乳頭に対して実時間で追従可能であると判断した。また、ロボットの運動学問題においては、手先位置から逆関節数に相当する逆運動学の計算によって各関節変位を求める方法を解析的に示した。ロボットの操作能力である“可操作度”を検討し、本システムは先に提案した標準作業域においては80%以上の高い可操作度で乳頭にカップを装着できることを明らかにした。

第6章では、開発したロボットシステムによる搾乳試験を実施した。牛体位置追従機構は、ストール内における牛の自由で大きな動きに円滑に追従するとともに、ロボット本体は乳頭の微小な動きに対して十分な追従性能を発揮した。ロボットは約60秒で乳頭にすべてのカップを自動装着し、その装着過程でのミルクラインへの大気流入量をほぼ最小限に抑止した。これらの試験結果より、本ロボットシステムは実用的な搾乳システムであることを確認した。最後に、本システムをプラットフォームとして乳頭洗浄や乳質モニタリング技術を付与することの必要性や将来展望を論じている。

以上、要するに本論文は、日本における搾乳牛の基幹的飼養方式である繋ぎ飼いを前提として、搾乳ロボットに求められる設計条件を提示した上で各要素技術を確立し、構築したシステムを用いて搾乳牛への適応性を検証したものであり、学術上、応用上貢献するところが少なくない。よって、審査員一同は、八谷満が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。