

ISSN 1341-0148

# 農業機械化研究所研究報告

## 第33号

---

Technical Report  
of  
Institute of Agricultural Machinery  
(Nogyo Kikaika Kenkyusyo)  
Saitama-city, Saitama, Japan  
No.33 January 2005

---

平成17年 1 月

農機研報

Tech. Rep. Inst.  
of Agric. Mach.

33:1-79  
Jan. 2005

独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構  
生物系特定産業技術研究支援センター  
農業機械化研究所  
埼玉県さいたま市北区日進町1丁目

独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構  
生物系特定産業技術研究支援センター  
農業機械化研究所

Institute of Agricultural Machinery  
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution  
Incorporated Administrative Agency  
National Agriculture and Bio-oriented Research Organization

編集委員会	Editorial Committee
相馬 厚司 (委員長)	Koushi SOUMA(Chief)
行本 修	Osamu YUKUMOTO
小倉 昭男	Akio OGURA
杉山 隆夫	Takao SUGIYAMA
安食 恵治	Keiji AJIKI
久保田興太郎	Kotaro KUBOTA
山名 伸樹	Nobuki YAMANA
小野田明彦	Akihiko ONODA
落合 良治	Yoshiji OCHIAI

農業機械化研究所研究報告 第33号 (平成17年1月)

目 次

八谷 満・平田 晃・市戸万丈・古山隆司・福森 功

繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムに関する研究

量記号一覧 (Nomenclature) .....	i
緒 言 .....	1
第1章 搾乳ロボット研究の現状, 背景, 目的と構成要素 .....	2
1-1 酪農を取り巻く現状 .....	2
1-2 搾乳作業の自動化 .....	4
1-3 搾乳ロボット化の歴史と問題点 .....	5
1-3-1 既往の研究史 .....	5
1-3-2 既往の要素技術研究の概況 .....	8
1) 乳頭の位置検出	
2) ティートカップのハンドリング	
3) 機械系設計の指針	
1-3-3 既往研究の問題点 .....	11
1-4 本論文の構成 .....	12
第2章 ホルスタイン種泌乳牛の乳頭配置とその経時的変動 .....	13
2-1 緒 言 .....	13
2-2 材料および方法 .....	14
2-2-1 分娩後経過に伴う乳頭配置の変動調査 .....	14
2-2-2 搾乳後経過に伴う乳頭配置の変動調査 .....	14
2-3 試験結果 .....	15
2-3-1 分娩後経過に伴う乳頭配置の変動 .....	15
2-3-2 搾乳後経過に伴う乳頭配置の変動 .....	17
2-4 考 察 .....	17
2-5 摘 要 .....	21
第3章 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 .....	21
3-1 緒 言 .....	21
3-2 繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムの設計概念 .....	21
3-3 設計指針の策定に向けた体尺測定調査 .....	22
3-3-1 材料および方法 .....	22
3-3-2 結果および考察 .....	23
1) 牛体位置検出に関わる空間領域	
2) 腹部下方における平面空間領域	

3) 腹部下方における鉛直空間領域	
3-4 マニピュレータの作業可能な空間領域と設計指針	26
3-4-1 マニピュレータ動作領域の限定	26
3-4-2 マニピュレータの冗長自由度とその利用	27
3-4-3 作業域とリンク長の決定	30
3-5 摘要	31
第4章 繋ぎ飼用搾乳ロボットとしてのシステム構成とタスク	32
4-1 緒言	32
4-2 繋ぎ飼用搾乳ロボットシステムの基本構想	32
4-3 ロボット機械系の構成	33
4-3-1 牛体位置検出・追従機構	33
4-3-2 ティートカップ自動装着機構	35
1) ティートカップ保持機構	
2) ロボットマニピュレータ	
3) エンドエフェクタ機構	
4) 局所的乳頭位置センサ	
4-4 制御システムとタスク	40
4-4-1 制御システムの構成	40
4-4-2 基本制御アルゴリズム	41
4-5 摘要	42
第5章 乳頭追従制御系とマニピュレータの操作能力	43
5-1 緒言	43
5-2 乳頭位置の検出・推定方法	43
5-3 マニピュレータの追従制御系	44
5-3-1 マニピュレータの動特性	44
5-3-2 乳頭への追従制御	46
5-3-3 サーボ制御系におけるサンプリング周波数	47
5-4 マニピュレータの運動学	48
5-4-1 目標手先位置を実現する関節変位の算出	48
5-4-2 与えられた手先速度を実現する関節角速度の算出	49
5-5 マニピュレータ機構の評価	49
5-6 摘要	50
第6章 ティートカップ装着アルゴリズムとシステムとしての適応性	51
6-1 緒言	51
6-2 乳頭位置のティーチング作業	51
6-3 ティートカップ装着アルゴリズム	52
6-3-1 乳頭探索手順	53

6-3-2 ティートカップ装着手順 .....	54
6-4 搾乳牛に対するシステムの適応性 .....	55
6-4-1 ロボット機械系に対する牛の馴致 .....	56
6-4-2 ロボット搾乳試験 .....	56
1) 牛体と乳頭の位置認識の適応性	
2) ティートカップのマニピュレーション	
3) 装着時のティートカップ内圧力応答	
6-5 最終考察と将来展望 .....	60
6-6 摘 要 .....	62
第7章 総 括 .....	62
7-1 搾乳ロボット研究の現状、背景、目的と構成要素 .....	62
7-2 ホルスタイン種泌乳牛の乳頭配置と経時的変動 .....	63
7-3 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 .....	63
7-4 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 .....	63
7-5 乳頭追従制御系とマニピュレータの操作能力 .....	63
7-6 ティートカップ装着アルゴリズムとシステムとしての適応性 .....	64
参考文献 .....	64
SUMMARY .....	73
謝 辞 .....	79

## 量記号一覧 (Nomenclature)

$ABSZ$ : カップ装着過程における乳頭検出昇降機位置 “m5” から真空適用開始位置までの距離 [mm]

$ABSHZ$ : カップ装着過程における真空適用開始位置から同終了位置までの距離 [mm]

$D_{r,max}$ : 乳頭の直径最大値 [mm]

$D_{r,min}$ : 乳頭の直径最小値 [mm]

$e_i$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節の変位現在値と目標値との差分 [°]

$F$ : ケーブル・チューブ類の引張力 [Nm]

$f_{ci}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節の固有周波数 [Hz]

$f_{pi}$  ( $i=1,2,3$ ): 位置制御ループの交差周波数 [Hz]

$f_x$ : リサージュ波形振動のX軸周波数 [Hz]

$f_y$ : リサージュ波形振動のY軸周波数 [Hz]

$G_{pi}(s)$  ( $i=1,2,3$ ): 位置目標値から制御量までの伝達関数

$i$ : マニピュレータの台座側からみた関節番号

$I_{Ri}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節のモータ慣性モーメント [ $\times 10^4$  kgm<sup>2</sup>]

$I_{Zi}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節軸のZ軸回りの慣性モーメント [ $\times 10^4$  kgm<sup>2</sup>]

$J(\theta)$ : ヤコビ行列

$K$ : ティートカップ装着成否判定時の定数 [-]

$K_{pi}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節の位置ループゲイン [-]

$K_{pi,max}$  ( $i=1,2,3$ ): 可変ゲイン設定時の制御ゲインの最大値 [-]

$K_{pi,min}$  ( $i=1,2,3$ ): 可変ゲイン設定時の制御ゲインの最大値 [-]

$l_i$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ第*i*番目のアームリンク長 [mm]

$l_m$ : マガジンアームのリンク長 [mm]

$m$ : エンドエフェクタ状態ベクトルの次元数 [-]

m5: 乳頭先端時の昇降機位置 [mm]

$M_{Ai}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各リンクの質量 [kg]

$M_{Bi}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータの各モータブラケットの質量 [kg]

$P_i$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節のモータ定格出力 [W]

$M_C$ : ティートカップ1本の質量 [kg]

$M_G$ : エアグリッパの質量 [kg]

$mgz_n$ : ティートカップマガジンのカップ番号 [-]

$M_{Mi}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節のモータ質量 [kg]

$M_{Ri}$  ( $i=1,2,3$ ): マニピュレータ各関節の減速機の質量 [kg]

$M_x$ : リサージュ波形振動のX軸幅 [mm]

$M_y$ : リサージュ波形振動のY軸幅 [mm]

$n$ : マニピュレータの自由度数 [-]

: 乳頭番号

: サンプリング行程数 [回]

: 乳頭吸引時のリサージュ波形振動回数 [回]

$N_r$ : 乳頭吸引時のリサージュ波形振動の分割数 [-]

$N_T [u]$  : シミュレーションによるローカルセンサ内の乳頭位置の総データ数 [個]  
 $P$  : 作業座標系におけるエンドエフェクタの中心位置  
 $P_x$  : 作業座標系におけるの $x$ 座標 [cm]  
 $P_y$  : 作業座標系におけるの $y$ 座標 [cm]  
 $r$  : エンドエフェクタ状態ベクトル  
 $r$  : ローカルセンサ中心から乳頭中心までの距離 [mm]  
 $R_{Ei} (i=1,2,3)$  : マニピュレータ各関節のエンコーダ分解能 [P/rev.]  
 $R_i (i=1,2,3)$  : マニピュレータ各関節の減速比 [-]  
 $r_T$  : 乳頭の半径 [mm]  
 $S_1$  : 自動搾乳ユニット昇降軸ストローク [mm]  
 $S_2$  : マニピュレータ上昇・下降用エアシリンダストローク [mm]  
 $S_i (i=1,2,3)$  : マニピュレータ各関節のモータ定格回転速度 [rpm]  
 $SR_{CBZ}$  : 乳頭探索過程における乳頭位置高さ“zu”から“探索開始位置”までの移動距離 [mm]  
 $SR_{CHX}$  : 乳頭探索過程におけるエンドエフェクタのX軸方向の移動量 [mm]  
 $SR_{CHY}$  : 乳頭探索過程におけるエンドエフェクタのY軸方向の移動量 [mm]  
 $SR_{CHZ}$  : 乳頭探索過程における昇降機の“探索開始位置”から“探索終了位置”までの移動距離 [mm]  
 $T$  : 転置  
 $t_{ai} (i=1,2,3)$  : マニピュレータ各関節の加速時間 [s]  
 $T_m$  : サーボ制御系における時定数[ms]  
 $T_s$  : サーボ制御系におけるサンプリング周期 [ms]  
 $T_{vr}$  : 応答時定数 [s]  
 $t_w$  : ローカルセンサ値を取得するための待機時間 [ $\mu$ s]  
 $u$  : 光電素子のon-off情報  
 $V_o$  : ティートカップ装着成否判定時の真空適用後圧力値 [kPa]  
 $V_s$  : ティートカップ装着成否判定時の真空適用前圧力値 [kPa]  
 $X_c [n]$  : マガジンアーム基本姿勢における第 $n$ 番目乳頭用カップホルダ位置のX座標 [mm]  
 $X_M$  : 作業座標系におけるマガジンアーム台座中心位置のX座標 [mm]  
 $X_T [n]$  : 第 $n$ 番目乳頭の教示位置X座標 [mm]  
 $X_T [u]$  : on-off情報に対応する推定位置のロックアップテーブルのX座標 [mm]  
 $Y_c [n]$  : マガジンアーム基本姿勢における第 $n$ 番目乳頭用カップホルダ位置のY座標 [mm]  
 $Y_M$  : 作業座標系におけるマガジンアーム台座中心位置のY座標 [mm]  
 $Y_T [n]$  : 第 $n$ 番目乳頭の教示位置Y座標 [mm]  
 $Y_T [u]$  : on-off情報 $u$ に対応する推定位置のロックアップテーブルのY座標 [mm]  
 $X$ - $Y$  : 牛体軸方向をY軸とする作業座標系  
 $zu$  : 乳頭地上高さに対応した昇降機の教示位置 [mm]  
 $(ex, ey)$  : 乳頭とローカルセンサ中心との位置偏差 [mm]  
 $(P_x, P_y)$  : 作業座標系における点の位置座標 [mm]  
 $(x_o, y_o)$  : エンドエフェクタ中心座標 [mm]  
 $(x_r, y_r)$  : ローカルセンサ内の乳頭位置  
 $(X_m, Y_m)$  : リサージュ波形の振動成分 [mm]

$\alpha$  : エンドエフェクタの姿勢角 [°]  
 $\beta$  : マニピュレータの  $\omega_{max}$  に対する  $\omega$  の割合 [-]  
 $\eta_i$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸の減速効率 [-]  
 $\theta$  : マニピュレータの関節変数ベクトル  
 $\theta_{ai}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節の加速区間 [°]  
 $\theta_{oi}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節の変位現在値 [°]  
 $\theta_{ci}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節の変位目標値 [°]  
 $\theta_i$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節の変位 [°]  
 $\theta_M$  : マガジンアームの展開角 [°]  
 $\theta_{oi}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節の変位出力値 [°]  
 $\theta_{ai}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸の必要加速トルク [Nm]  
 $\theta_{ci}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸の必要トルク [Nm]  
 $\tau_{MAXi}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸の最大トルク [Nm]  
 $\tau_{Ri}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸のモータ定格トルク [Nm]  
 $\xi_i$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸の減衰係数 [-]  
 $\omega$  : マニピュレータの可操作度 [-]  
 $\omega_i$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節の固有角周波数 [Hz]  
 $\omega_{max}$  : マニピュレータの最大可操作度 [-]  
 $\omega_{Mi}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸の角速度 [rad/s]  
 $\omega'_{Mi}$  ( $i=1,2,3$ ) : マニピュレータ各関節軸の角加速度 [rad/s<sup>2</sup>]  
 $\omega_s$  : サンプリング角周波数 [Hz]  
 $\Delta \tau_i$  ( $i=1,2,3$ ) : モータ定格トルクと必要トルクとの差分 [Nm]  
 $\Sigma_0$  : ベース座標系  
 $\Sigma_h$  : エンドエフェクタの座標系  
 $\Sigma_i$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ ) :  $\Sigma_0$ より見たリンク*i*の座標系  
 $\Sigma_n$  : リンク座標系  
 $\Sigma_r$  :  $\Sigma_h$ の位置, 姿勢を表示する基準座標系  
 ${}^rH_0$  :  $\Sigma_r$ から  $\Sigma_0$ への同次変換行列  
 ${}^nH_h$  :  $\Sigma_n$ から  $\Sigma_h$ への同次変換行列  
 ${}^n\mathbf{n}_h$  :  $\Sigma_h$ の姿勢を表す法線ベクトル  
 ${}^r\mathbf{o}_h$  :  $\Sigma_h$ の姿勢を表す方向ベクトル  
 ${}^r\mathbf{a}_h$  :  $\Sigma_h$ の姿勢を表す接近ベクトル  
 ${}^r\mathbf{p}_h$  :  $\Sigma_h$ の  $\Sigma_r$ に対する位置ベクトル  
 $x_0, y_0, z_0$  :  $\Sigma_0$ の各軸方向  
 $x_h, y_h, z_h$  :  $\Sigma_h$ の各軸方向  
 $x_i, y_i, z_i$  :  $\Sigma_i$ の各軸方向  
 $x_n, y_n, z_n$  :  $\Sigma_n$ の各軸方向  
 $x_r, y_r, z_r$  :  $\Sigma_r$ の各軸方向



# 繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムに関する研究

八谷 満\*・平田 晃\*\*・市戸万丈\*\*\*・古山隆司\*\*\*\*・福森 功\*\*\*\*\*

- \* 畜産工学研究部 (現 生産システム研究部)
- \*\* 畜産工学研究部
- \*\*\* 畜産工学研究部 (現 畜産草地研究所畜産環境部)
- \*\*\*\* 畜産工学研究部 (現 企画部)
- \*\*\*\*\* 畜産工学研究部 (現 オリオン機械株式会社)

## 抄 録

繋ぎ飼いを前提とした搾乳の自動化，特に自律的にティートカップを装着するためのロボットシステムの開発を最終目標とし，本研究に着手した。

まず，異なる産次や泌乳期の搾乳牛を対象として牛の体尺を測定し，併せて乳頭位置の生理的変動からロボット機構に求められる機械設計指針を考察し，提示した。次に，繋ぎ飼い特有の条件を踏まえて，無制御で牛体の動きに追従する牛体位置検出機構を基軸として，これにロボットマニピュレータを含む自動搾乳ユニットを連結する機械システムを考案し，提案した。本システムによって，牛と機械システムの平面的位置関係を維持した。さらに，実時間で乳頭に追従可能なロボットシステムの乳頭位置センサやマニピュレータ等構成要素および制御アルゴリズムを構築した。ロボットの乳頭追従制御アルゴリズムにおいては，マニピュレータ各関節の周波数応答解析に基づく位置制御ループの設計開発を行った。また，前記指針に基づいて設定したロボットの標準作業域において，マニピュレータの可操作度を検討し，ロボットシステムの有用性を示した。

最後に，開発した搾乳ロボットシステムを供試して搾乳牛への適応性を検証した結果，牛体と乳頭への追従性およびティートカップ装着時のタイミングは良好であり，牛の自由な挙動を許容しつつ自動で搾乳できることを確認した。

## 緒 言

生物生産技術開発の目的は，生物を適正管理することによって生物が持つ機能を最大限に発揮させ，目的とする生産物を効率的に得るように制御することと解釈できる。そのための操作や作業の高効率化のための機械化・自動化が進み，生産性の向上と品質向上に貢献している(岡本ら，1992)。とりわけ農業生産に伴う作業は，その対象が自然的要因に左右される生物であることから，人間の持つ柔軟で総合的な認識・判断機能に依存する傾向が強く，従来の技術では機械化の実現が困難な作業も少なくない。その課題解決のためには新しい生物生産技術の展開が求められている。人間に限りなく近い機能を追及しつつあるロボットへの期待が極めて大きく，労働力不足の社会環境下で，人手のかかる生物生産を効率化

するための省力化技術が必要である。

さて，我が国の酪農業の実態は経営規模拡大の進展が極めて顕著で，生産性向上による経営安定化のため，より効率的な経営技術の確立が緊要とされている。特に乳牛の使用管理作業のうちで最も大きな役割を占める搾乳作業については，従来から各種の機械化技術の確立が図られてきたところであるが，我が国の生乳生産の約80%を担っている繋ぎ飼い方式を前提とした搾乳作業の省力化または自動化技術が強く要請されてきた。こうした情勢に鑑み，本研究では繋ぎ飼いにおける労働の質的向上と規模拡大に資する効率的飼養管理システムの一貫として，繋ぎ飼い方式の乳牛を対象とした「ティートカップの自動装着」を果たす搾乳ロボット技術の確立を目指した。

なお、本研究は農林水産省農業機械等緊急開発事業の一環として、1993年度から研究課題「搾乳ロボットの開発」として5年間展開してきたもので、本報告はその過程で得られた機械システムとしての搾乳ロボットの設計指針およびその適応性評価について取り纏めたものである。

現段階では、今後一層の研究深化を要する項目もあるが、本研究が繋ぎ飼用搾乳ロボットシステムとして提言できる段階に達したと考えられるため、これを機に研究成果を取り纏め、併せて残された問題点を整理した次第である。

## 第1章 搾乳ロボット研究の現状、背景、目的と構成要素

### 1-1 酪農を取り巻く現状

表1-1に我が国の農業総産出額の一般動向を示した。2001年における我が国の畜産の産出額は、農業総産出額8兆8千億円の中の約27%に相当する2兆4千億円を占めている。この割合は、約25%の米(約2兆2千億円)や約23%の野菜(約2兆1千億円)を凌いでトップに位置しており、畜産は我が国農業の基幹部門であることを明確に示している。さらに、この畜産の産出額においては畜産全体の32%(7千7百億円)を乳用牛が担っており、その87%以上が生乳部門である。

「新たな酪農・乳業対策大綱」(農林水産省、1999)においては、牛乳・乳製品の需要は、国民所得の増加に伴い飛躍的に拡大し、食生活の変化をリードしてきたと

している。その背景として、牛乳等はその商品特性等から輸入が困難であり、また乳製品については十分な国境措置等が確保されてきたことから、牛乳・乳製品の供給は基本的に国内生産によって行われ、我が国の農産物の中では比較的高い自給率が維持されてきた。併せて、優れた経営感覚を有する専業かつ規模の大きい酪農家が大宗を占める農業構造が実現するとともに、これらの酪農家が、欧州を比肩できる水準にまで飼養規模の拡大を進めるなど、生産性の向上が図られてきたことが指摘されている。

ここで、我が国の畜産の産出額において全体の32%を占める乳用牛の飼養動向を図1-1に示す。乳用牛の飼養頭数は、1979年に200万頭を超えて以来、ほぼ横這い状態を続けていたが、1995以降緩やかな減少傾向に転じており、2001年現在では172万頭(経産牛:112万頭)となっている。この間、飼養農家戸数は、一貫して減少する傾向を示し、特に近年は年率3~5%の割合で減少しており、2001年現在では32,200戸となっている。従って、農家1戸当たりの乳牛飼養頭数は増加傾向を示し、2001年では全国統計では53.6頭(北海道:88.6頭、都府県:38.6頭)で経産牛頭数は34.9頭(北海道:50.7頭、都府県:28.3頭)となるなど、飼養規模は着実に拡大している。2001年度畜産経営の動向(農林水産省、2002)によれば、成牛50頭以上の経営層が我が国の総飼養頭数の55%を飼養するに至っている。すなわち、大規模飼養農家は増頭を進めたものの、小規模層を中心に飼養を中止したことが大きく影響しており、その

表1-1 日本の農業総産出額の構成

区分/年	1975	1985	1995	1999	2000	2001
農業総産出額	90,514	116,295	104,498	93,638	91,295	88,813
耕種	65,012 (71.8)	82,996 (71.4)	78,513 (75.1)	68,209 (72.8)	66,026 (72.3)	64,077 (72.1)
うち 米	34,658 (38.3)	38,299 (32.9)	31,861 (30.5)	23,761 (25.4)	23,210 (25.4)	22,284 (25.1)
野菜	14,673 (16.2)	21,104 (18.1)	23,978 (22.9)	22,395 (23.9)	21,139 (23.2)	21,188 (23.9)
畜産	24,867 (27.5)	32,531 (28.0)	25,204 (24.1)	24,670 (26.3)	24,596 (26.9)	24,125 (27.2)
a. 乳用牛	5,655 ( 6.2)	8,876 ( 7.6)	7,914 ( 7.6)	7,707 ( 8.2)	7,675 ( 8.4)	7,721 ( 8.7)
うち 生乳	4,648 ( 5.1)	7,596 ( 6.5)	7,014 ( 6.7)	6,879 ( 7.3)	6,822 ( 7.5)	6,758 ( 7.6)
b. 肉用牛	2,467 ( 2.7)	4,727 ( 4.1)	4,494 ( 4.3)	4,400 ( 4.7)	4,564 ( 5.0)	4,369 ( 4.9)
c. 豚	7,333 ( 8.1)	7,910 ( 6.8)	5,059 ( 4.8)	4,802 ( 5.1)	4,616 ( 5.1)	5,007 ( 5.6)
d. 鶏	7,471 ( 8.3)	9,342 ( 8.0)	7,011 ( 6.7)	7,050 ( 7.5)	7,023 ( 7.7)	6,349 ( 7.1)
e. その他	1,941 ( 2.1)	1,675 ( 1.4)	724 ( 0.7)	711 ( 0.8)	719 ( 0.8)	679 ( 0.8)
加工農産物	635 ( 0.7)	768 ( 0.7)	781 ( 0.7)	759 ( 0.8)	673 ( 0.7)	611 ( 0.7)

注) 「畜産の動向」(農林水産省、2002)より作表

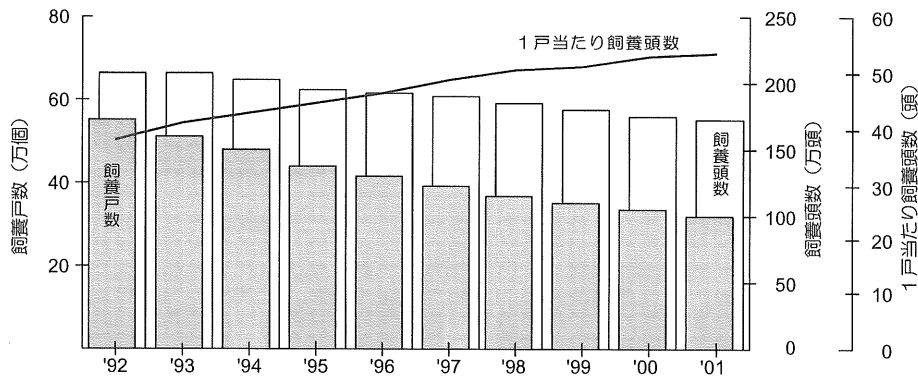


図1-1 乳用牛の飼養戸数・頭数の推移

注) 「畜産の動向」(農林水産省, 2002)より作成

背景には農業従事者の高齢化と相俟って担い手の育成・確保の必要性、畜産環境問題の深刻化、輸入飼料への過度の依存等の問題(農林水産省, 1999)が挙げられている。また、1頭当たり飼養管理労働時間は飼養管理の高度化もあって短縮されているにもかかわらず、それが従事者の飼養管理労働時間全体の短縮化には必ずしも反映されていないという問題が指摘されてきた。ゆとりある酪農経営の確立と生産性の一層の向上が重要な課題となっている所以である。

表1-2に、全国の搾乳牛1頭当たりの年間飼養管理労働時間を示した。1頭当たりの飼養管理労働時間は、多頭化することですべての項目で短縮されているものの、規模別にみると特に50頭規模以上の基幹酪農家層においては、搾乳作業が飼養管理労働時間の約50%を占める結果となっている。こうしたことから、労働時間の軽減および周年拘束性の解消を図り、ゆとりある生産性の高い酪農経営の実現を図るためには、飼養管理技術の高度化の一環として搾乳作業の大幅な軽減が望まれる。前出の「新たな酪農・乳業対策大綱」(農林水産省, 1999)においても、労働時間の短縮や効率的な飼養管

理を推進する新たな技術の開発・実用化の重要性を指摘する。

我が国の乳牛の多くは、以前から繋ぎ飼い方式で飼われてきた。一方で、近年、酪農の生産性を高めるために規模拡大が進み、家族経営の枠内で繋ぎ飼い管理する限界を超える規模にまで拡大されつつあり、放し飼い方式に移行する酪農家は着実に増加している。1990年代に入って、特に大規模経営体の育成・強化という国の意図に沿ったフリーストール・ミルクパーラ(以下、F・M)方式による飼養形態が脚光を浴びてきた。

ここで、図1-2に経産牛の畜舎形態と搾乳形態を示す。経産牛の牛舎形態は繋ぎ飼いが92.7%、フリーストールが6.4%であり、搾乳形態ではパイプラインミルクが70.1%、バケットミルクが23.4%、ミルクパーラが4.7%となっている。よって、我が国の生乳生産の約2/3は、繋ぎ飼い・パイプラインミルク方式と推定される。

繋ぎ飼いにおいては、家族労働力2人の場合、経産牛40~50頭規模が搾乳労働的に限界と言われるが、F・M方式においては、土地基盤や糞尿処理に関する多額の新規設備投資などから移行できる農家は限定される。

表1-2 頭数規模別搾乳牛通年換算1頭当たり飼養管理労働時間

(単位: 時間/年)

規模別頭数	総計	飼料調製・給与	敷料搬入・糞出	搾乳等	飼育管理	厩肥処理等
1~9頭	254.16	63.95	39.77	94.71	18.77	7.77
10~19頭	182.30	46.26	26.41	72.99	14.19	3.90
20~29頭	151.88	40.19	17.37	63.24	13.49	2.76
30~49頭	128.35	31.15	14.10	54.84	13.61	1.90
50~79頭	97.76	21.19	10.61	45.08	9.31	0.79
80頭以上	77.72	15.07	9.81	36.38	8.48	0.60

注) 「農業経営統計調査 平成13年牛乳生産費(全国)」(農林水産省, 2001)より作表

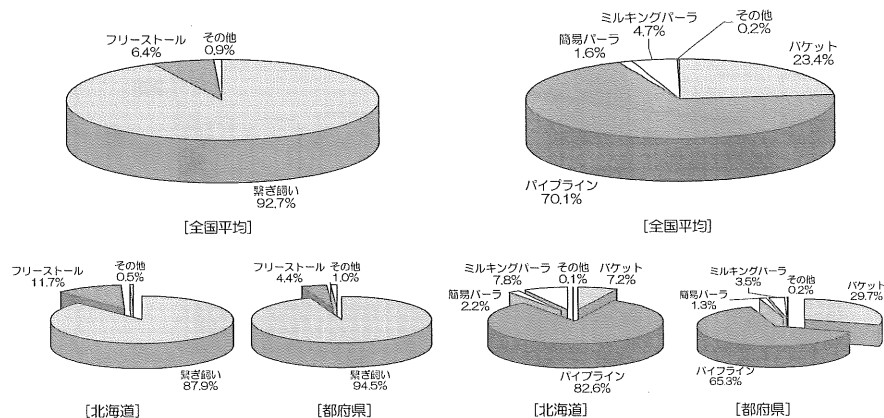


図1-2 経産牛の飼養形態と搾乳形態

注) 「平成11年度酪農全国基礎調査」(中央酪農会議, 2000)より作成

繋ぎ飼いは、将来の酪農においても主要な位置を占めると考えられ、その自動化や高度化が重要な課題となる。新たな飼養管理技術の開発に際して、対象とする経営規模は、規模拡大への対応とF・M方式との棲み分けも考慮して、経産牛頭数で40～70頭規模を中心と設定するのが望ましい。また、各種アンケート調査からは、F・M方式による"個体管理の難しさ"が指摘されてきた。F・M方式が多頭数牛群の斉一な省力管理であるのに対して、これからの繋ぎ飼いは上記設定頭数規模を対象とした知識集約的精密管理を目指す方向が努力目標になると考える。すなわち、それは繋ぎ飼いにしかできない精密個体管理を意味するが、作業者の労働環境を同時に整備しなければ、作業性は逆に低下するだろう。そうした個体管理システムの克服すべき課題は、舎内管理作業のうち特にウエートの高い搾乳と給飼作業の二つを挙げることができる。ただし、給飼においては個体管理の強化を追求した作業技術体系がすでに確立され、今後の普及が期待される。一方、飼養管理作業の効率化・省力化に向けては、抜本的な対策を図る必要があるのが搾乳作業であることに誰しも異論はないであろう。

前述のように、現段階において特に50頭規模の基幹酪農家層においては、飼養管理労働時間の過半を占める作業は搾乳である。搾乳作業は、その優劣が乳量や牛の乳房炎罹患に直接関係するとともに、周年拘束性の極めて高い作業であることから、飼養管理労働の質的観点からもゆとりを得るための隘路となっている。繋ぎ飼いで搾乳システムとしては、パイプラインミルクが一般的である。従来のパイプラインミルクでは、・搾乳の前後

作業を含めて屈む回数が多い、・作業姿勢が悪い、・ミルクカップの位置が高く着脱しにくい、・重たい搾乳ユニットを牛から牛へと運搬するのが負担である等の問題が指摘されてきた。さらに、過搾乳防止を目的に自動離脱装置付きのユニットを導入する酪農家が増える中、その質量は1基当たり7～8kgと重く、作業者の労働負担の点でその移動・着脱に問題が残されていた。近年、搾乳ユニットの運搬方法を改善する方法として、天井に設置したレールにユニットを懸垂し、手で軽く押すだけで移動できる懸垂型搬送システムが普及しつつある。本システムの導入により、作業者の一定の筋負担および労働負担が軽減される効果は認められる(八谷, 1995)ものの、作業時間の短縮あるいは搾乳作業からの解放という点では大きな改善効果はなく、規模拡大志向においては過渡的な軽労化技術と位置付けることができる。

## 1-2 搾乳作業の自動化

既に普及段階に入りつつある、放し飼いを前提とした搾乳ロボットの出現までは、最も自動化の進んだミルクシステムとしてのパーラはオートタンデム方式であった。このパーラにおいては、ストール入口ゲートの開閉、牛個体番号の認識、乳頭清拭およびティートカップ(以下、カップ)装着、続いて搾乳中の乳汁の流出状態や乳質の異常を流量計、電気伝導度計および温度センサで監視し、流量に応じてカップを自動離脱する。搾乳量は自動的にファイルに保存されるとともに、乳頭への自動薬液スプレー、ストール出口ゲートを自動的に開閉する。以上の牛の誘導から退出までの工程において、自動

化できていないのが「乳頭清拭」と「カップの装着操作」のみであった。これらの自動化は、搾乳作業者の労働負担の改善に著しく貢献し、またその効果としてゆとりをもって牛の健康状態を観察できることから、作業精度面においても若干の貢献があったと推測される。しかし、残された二つの要素技術が確立されない限り最低1名の作業者が拘束され、「作業からの解放」の面では特段の貢献はなかったと考えられる。将来的には、抜本的な投下労働時間の減少や作業能率の向上に寄与する形で、搾乳作業の自動化が図られるべきであるとの統一した認識が存在していた。そこで、最終的に残された上記要素技術を確立して台頭してきた搾乳ロボットシステムの大半は、タンデムストールをベースとした設計となっている。

乳牛の高泌乳化が進む中で、遺伝的な形質による搾乳速度は全体的に速くなる傾向にある。しかし、搾乳速度には個体差があるため牛群内での搾乳速度のばらつきは増加していると推察される。そこで、狭義の搾乳技術においては、乳汁流量の高速化に向けて拍動パターンの可変ミルクや、各分房の泌乳速度に応じた制御技術が開発されており、一部は市販されている。カップの自動装着システムにこうした精密搾乳技術を組み込むことによって、搾乳時間の短縮と乳量の増大等生産性の向上、さらに乳頭への負荷低減効果が期待できる。

繋ぎ飼い牛舎における搾乳ロボットは、人の認識や判断によらず完全に独立して個体ごとの牛体情報データに基づいて、自律的に各個体に移動・アクセスして牛の自発的行動に依らずに搾乳作業計画を実行することが期待される。なお、ミュンヘン工科大学のPIRKELMANN (1992) は、早くから放し飼い用搾乳ロボットの運用における給飼戦略の重要性を指摘しているが、繋ぎ飼いにおいてはTMRを個体ごとに多回給与する自動給飼装置と搾乳ロボットを有機的に連動させることにより、極めて精緻な飼養管理システムになると考えられる。

放し飼い・繋ぎ飼いの飼養形態に関わらず、効率的な搾乳作業の自動化に向けた最大の技術的課題は、乳頭位置検出とカップ装着のロボット化に集約されるが、放し飼い方式においては後述するように欧州に開発研究の遅れをとった感は否めない。これに対して、本論文では、研究対象として、繋ぎ飼いを前提とした搾乳のロボット

化技術の開発研究を取上げており、諸外国においては類をみない。

### 1-3 搾乳ロボット化の歴史と問題点

#### 1-3-1 既往の研究史

世界で初めて搾乳ロボット化に関する特許が出願されたのは、1971年の旧東ドイツであった。これは、一般的なカップを用いたものではなく、乳房全体に装着するライナレスミルクを前提として、ストール床面から装着しようとする試みであった。これに対して、4本のカップを装着する本格的な開発研究に着手したのは日本であった。わが国での搾乳ロボット化の研究は、1972年から5ヵ年計画で開始した「搾乳作業の省力化に関する研究」であり、農林水産省畜産試験場を中心とする研究チーム（静岡県畜産試験場、農業機械化研究所、農電研究所が参画）により繋ぎ飼い牛舎への適用を前提に開発が行われた。これもストール床面から搾乳ユニットが這い上がる方式を採用しており、乳頭検出は光電素子を配列した接触式センサを用いていた。また、理想的な牛体姿勢・位置を確保するために6種（起立・頸横方向・頸縦方向・肩・腰角・後肢間）の規制装置を装備していた（野附、1979）が、逆にいえばここまでしなければ乳頭位置検出・追従・カップ装着が実現困難であることを物語る。結果的には、牛の動きに実時間で追従する実用機までには至らなかった。野附は、幾多の試行錯誤を繰り返した経験と、実用化できなかつた反省（野附、2000）から次の3点の重要性を述べている。

- a. 牛を強制的に抑えるべきではない、
- b. 乳頭検出とカップ誘導は実時間で行う、
- c. カップ装着は牛の動きに常に追従する、ことを挙げている。

1980年代になるとコンピュータ技術の目覚ましい発達とともに、西ヨーロッパ諸国に酪農の自動化を目指す機運が生まれた（SCHONら、1992）。特にオランダでは、1970年代から急速にフリーストール牛舎が普及したのに伴い、NEDAP社は放し飼いでの個体管理を実現するために電子個体識別装置を開発し、これを利用した濃厚飼料の個体別自動給飼装置の普及に力を入れた。期をほぼ同じくして斯かる研究開発が欧州各国で進められたものの、1978、1983年とオランダのWAGENINGENで

開催されたシンポジウム "AUTOMATION IN DAIRYING"において搾乳ロボット化技術に直接関わる発表は、ORDOLFF (1983)による熱赤外センサを用いての乳房と乳頭先端部との温度差に基づく乳頭位置検出法のみであった。その他関連する発表として、個体識別や搾乳中の異常乳の検出、発情・疾病牛発見の自動化や乳量記録の自動化などがあつた。

1987年に同地で開催された第3回同名シンポジウムでは、発表された47題のうち7題(イギリス3題, ドイツ2題, フランス1題およびデンマーク1題)が搾乳の自動化に関連するものであり、関連研究が加速してきた裏付けとなっている。しかしながら、この段階においても搾乳ロボットの導入を想定し、頻回搾乳がもたらす生産性や経済性効果のシミュレーション等が主たる内容であった。

さらに、搾乳の自動化に的を絞って、1992年同地で開催された "PROSPECTS FOR AUTOMATIC MILKING"においては、欧州各国の研究機関や民間企業において開発段階の機械システムの現状や展望、および搾乳ロボットを基軸とする飼養管理システムが示されるに至って、搾乳ロボットが急速に現実味を帯びてきた。本シンポジウムは五つのセッションに分かれ、a. 搾乳ロボットシステム(9題)、b. 乳質問題(15題)、c. 頻回搾乳(12題)、d. 牛群管理法(12題)、e. その他(8題)であった。このシンポジウムが与えたインパクトこそが搾乳ロボット時代の幕開けであったと言っても過言ではないだろう。

オランダのIMAG-DLOは、今でこそ環境問題に研究の重点を移したが、当時は上記シンポジウムの開催にみられるように、国際的な搾乳ロボット開発の牽引役になったことは明白である(KASHIWAMURA, 2000)。搾乳ロボットを開発する上で最大の課題であった乳頭検出方法とティートカップの自動装着技術については、各国の研究機関や企業が独自のアイデアで開発を進めた。オランダでは1985年にIMAG-DLOが中心となり、NEDAP社(個体識別装置)、VICON社(農業機械メーカー)、PHILIP(家電メーカー)、NRS(乳牛検定組合)の連携体が組織され、将来の酪農場自動化計画(FARM2000)が企画された(ROSSING, 1988)。搾乳ロボットを先駆的に市販化したPROLION社や現在高

いシェアを誇るLELY社についても、初期のFARM2000に参画していたメンバーが起業化したり、また農業機械メーカーに開発を促した経緯がある。

オランダではその他にGASCOIGNE MELOTTE社も開発に着手したが、乳頭検出法に遅れをとり、幾つかの研究機関に試験的に設置はしたものの実用機完成には至らなかった。イギリスのSILSOE研究所は、1980年代初頭より独自で空気圧サーボによるマニピュレータの開発に着手していたのは興味深い。現在市販されているほとんどの搾乳ロボットは、マニピュレータ各軸方向に構成された空気圧シリンダを用いた位置サーボ機構を採用している。すなわち、空気が有する圧縮性によって家畜からの衝撃反力は吸収・緩和され、位置サーボ機構の弾性特性が搾乳ロボットの使用状況においては不可欠な要素であるといえる。これは技術面において着目すべき点であり、その後スウェーデンのDE LAVAL(旧ALFA LAVAL AGRIC)社がこれをベースに実用機を完成させた。また、ドイツではFALやDUVELSDORF社でも独自に開発を進め、その後大手酪農機器メーカーのWESTFALIA社は後者の技術を買収・市販化した。フランスのCEMAGREFにおいては、ユーレカプロジェクト"CIMIS"に参画して開発を進めた。これら欧州各国での研究開発の状況については、野附ら(1993)、福森ら(1993)や八谷(1995)の報告書に詳しい。また、搾乳ロボットの工学的側面に関する文献翻訳資料としては、生研機構が纏めた「搾乳の自動化に関する調査資料」がある(生研機構, 1995; 生研機構, 1996)。

2000年8月にはオランダのLELYSTADでシンポジウム"ROBOTIC MILKING"が開催された。主たる発表内容は、ロボット搾乳に伴う乳質の問題提起やロボットを基軸とする飼養管理技術: カウトラフィックに伴う給餌戦略と機械・施設のレイアウト、システム処理能力に関するものであった。一部には泌乳量に応じた拍動可変制御技術等の周辺・要素技術はあるものの、新規に開発されたロボット技術に関する報告は皆無であった。すなわち、機械としてのロボット本体の技術的課題はほぼ解決され、実用レベルでの問題提起がされつつある(八谷ら, 2001)。搾乳ロボットは機械工学的には実用上問題のないレベルにまで完成されたと見なされているということであろう。ここ3年以内に新規参入や市販機の市場投入を

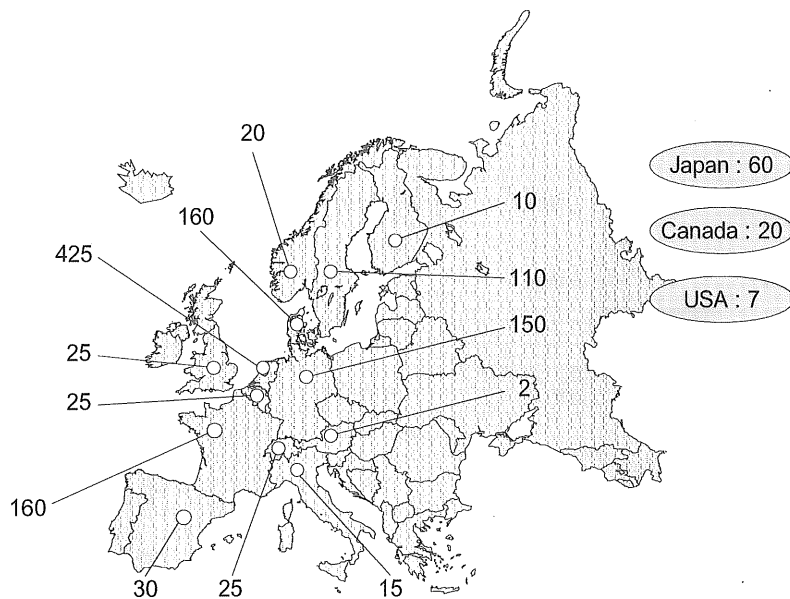
果たした企業が相次いだことも、搾乳ロボット市場が急速に増大しつつあることを示している。

さらに、当初搾乳ロボットに対して関心が薄いとされていた米国ではあったが（生研機構，1992；畜産技術協会，2000），家族経営型農場が多く存在する北米や米国東部では近年徐々に関心が高まり，普及の兆しをみせた状況を踏まえ（RODENBURG，2001；KELTON，2002），2002年3月には北米トロント市において第1回北米国際会議"ROBOTIC MILKING"が開催された。本会議は，内容的には前述2000年開催シンポジウムと大きく変わることはないものの，現場に導入されたシステムの稼動状況をもとに解析した発表が多くを占め，米国の生産者や研究者を始めとして22ヶ国300名以上の参加者が集うものであった。

1992年に搾乳ロボットが初めてオランダの酪農場に導入されて以来，図1-3に示すように，2001年12月時点においてオランダを筆頭に世界中で1,200戸以上の現場で稼動しており（KONING，2002），現実的な飼養管理システムの一つの形態として定着し始めている。搾乳ロボット導入の主たる目的は，搾乳作業を機械に代替させることにあり，時間的な拘束作業からの解放に伴って，酪農家の労働形態を大きく変化させることが予想される。別な観点からの導入効果として，頻回搾乳に伴う産乳量の増加が期待される。

欧州では，ミルククォータ制度による生乳出荷制限，環境政策による増頭の困難さが牛群の能力向上に邁進させ，搾乳ロボットに結びついたと考えられる。なお，ミルククォータ制度は1984年にECの共通農業政策（CAP）の一環で導入され，その基本的考えはEC加盟国ごとに農家レベルまで出荷乳量を割り当て，割当量を超過して出荷した牛乳には非常に重い課徴金を課するというものである。搾乳ロボットに対して否定的な見解を抱いていた米国においても，都市近郊酪農に押し寄せる環境政策に端を発して飼養頭数を減らしてもロボットによる頻回搾乳がもたらす出荷乳量の維持が期待できるとして近年肯定的な姿勢を展開し始めている（REINEMANN，2002）。

ミルククォータの購入義務がない米国や日本においては，欧州と異なり，損益分岐投資水準がより高い結果を得ることができると推察できる（HARSH，1992）。欧州における搾乳ロボットシステムを取り巻く農家の運営管理に関する実情はオランダ畜産研究所（PV）の経済的評価資料に詳しい（ARENZENら，2000）。こうして考えると，労賃が高く，出荷乳量の制約がなく，さらに環境政策が厳しくなりつつある国においては，近い将来において酪農経営の方向付けをする場合に，搾乳ロボットが重要な選択肢に含まれることが予想されるのである（LINDら，2000）。さらに，前述したようにわが国



※オランダ畜産研究所、Kees de Koning氏の提供

図1-3 世界における搾乳ロボットシステムの導入実績(2001年12月現在)

は、

- 1) 「規模拡大の余地が大きい」面と「家族経営労働力の範囲での省力的な飼養管理」を志向する両面から抜本的に搾乳作業を効率化する必要があること、
- 2) 物価水準からみて乳価が相対的に欧米より高い、等の利点から搾乳ロボットにとって有力な市場であることを示している。

日本においては、1972～1977年に行われた前記の研究以降、しばらくかかる研究開発が中断されていた。1986～1989年に北海道立根釧農業試験場と北海道立工業試験場の共同研究が実施されたが(澤山ら, 1990)、実用機の完成には至らなかった。その後、前記欧州での開発実態を踏まえて、1993年には生研機構民間研究促進業務の一環で放し飼いで搾乳ロボットの開発を目的として、オリオン機械株式会社が母体となるM.A.T.社が設立され、1999年11月には国産初の搾乳ロボットシステムが発表された。

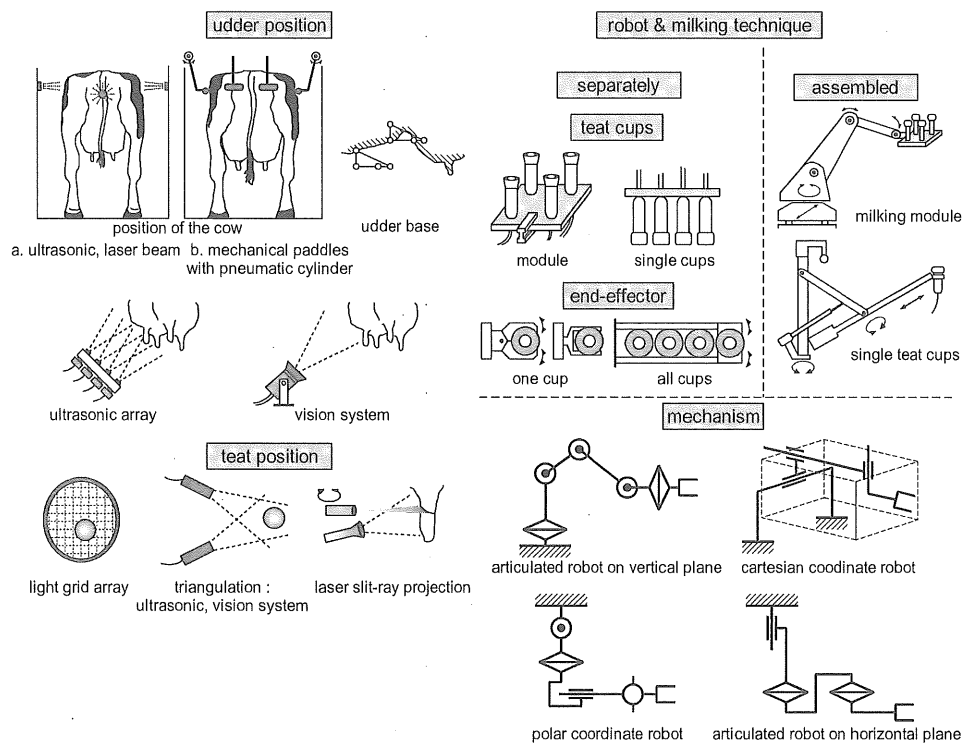
1-3-2 既往の要素技術研究の概況

1980年代後半には搾乳作業の完全自動化に向けて、近年のセンサ技術やロボット工学技術の著しい進展によ

り、最後の段階に突入したという見方が台頭してきた(SCHONら, 1992)。その主たる開発目標は、前述の乳頭検出法とカップ装着のマニピュレーションであった(図1-4)。

1) 乳頭の位置検出

一般的には乳頭の位置決めは、①乳房の概略位置の特定、②乳頭個別の位置精査という2段階の工程を踏む(SCHONら, 1992)。1972年に開始したわが国での搾乳ロボット化研究では、牛体の位置・姿勢を規制し、乳頭位置をストール上のある空間に固定することを前提とした。特に横臥または採食中の牛を起立規制するために、モータで牛の頭絡用ロープを巻き上げ、牛体規制を行うことにより乳頭の概略位置決めを実現した(野附, 1979)。乳頭の位置決めは幾つかの方法が試作検討された。その位置決め法は、個体ごとの乳頭配列データベースのみに基づくカップ誘導やテンプレートガイドの併用、約100mm角のフレーム内側に光電素子を配列して、この中に乳頭を包囲して位置を精査する方式などが検討されたが、最終的には分布するカー乳頭端の接触圧を検知する分布形センサ、すなわち圧覚センサに類似した方式



※ (SCHONら, 1992) を一部改変

図1-4 搾乳ロボットシステムにおける要素技術



によった。この分布形（マトリクス）センサは、320×314mm角のプレートを乳房下から押し当てて、そのセンサ面上の局所的情報を出力する必要があるため、集中形圧覚センサよりもセンサ情報の取り出しに工夫を要するものであった。また、4乳頭同時にセンサ面上に接触させることを前提としたことから、乳頭の地上高が揃わない場合とともに、前房乳頭間距離が広すぎる牛に対しては困難を要した。

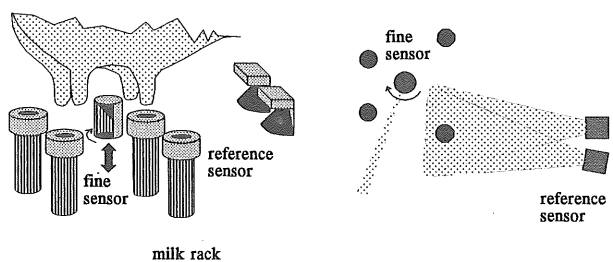
MOTTRAM (1992) は、ストール床形状の改変による後肢の規制と乳頭の視認性の有利性を提案している。すなわち、前肢の床面を10~20cm高めることによって牛の体重が後肢にかかることから、後肢の動きが抑制される。また、前肢の蹄の位置が後肢のそれより高くなることから、牛の前駆が後駆より高くなり、結果として後肢間に隠れる後乳房を前方に露出させることによって、後乳頭の位置検出やカップの装着精度が高まる (HOGEWERF, 1992; 新出ら, 1994)。欧州の研究機関では、乳頭位置決め技術と併せて、搾乳ロボットの作業環境であるストールの改変を含めた整備を進めてきた。

搾乳ロボットシステムが台頭した1990年代初頭から半ばにかけて、システムの代名詞にもなったPROLIONにおいては、三角測量の原理に基づいて超音波を用いて右前乳頭を基準として計測・追従しながら、4乳頭の空間中央部で回転する超音波センサで乳頭間の距離を精査する (図1-5: HOGEWERFら, 1992)。これを含む搾乳ロボット用センサは、そのほとんどがロボットの手先効果器 (以下、エンドエフェクタ) に搭載される方式であり、センサ自身の方向が手先とともに制御されるので特定方向の距離を測定することになる。幾つかのパラメータが自動的に指定されるので、距離測定の計算は容易である。LELYやDE LAVAL, WESTFALIA,

GALAXYおよびM.A.T.などほとんどのシステムにおいては、超音波等非接触式センサで牛体の任意の位置を検出して牛体への追従を図った上で、個別の乳頭位置検出は三角測量法に基づく超音波センサシステムあるいはレーザレンジファインダを用いた光切断法を用いている。特に後者はレーザ光を能動的に走査することでパラメータの値を指定し、残るパラメータについては基線距離を隔てたホトセンサから得る。従来はコスト面だけでなく、環境に対するロバスト性などの問題のため、生産現場に導入されにくかったレンジファインダであったが (KONDO, 1995; 石井, 1998)、技術の進展によって搾乳ロボットの乳頭位置認識センサとしても利用が拡大されており、センサとして新たな局面を迎えたといえる。すなわち、ロボットアーム先端にティートカップ装着のためのツールとセンサ (Eye in Hand) を搭載したシステム構成にとって、三角測量に則った走査型レンジセンサの小型化 (投光器と受光器間の基線長の短縮と同義であり、高分解能の受光素子を採用する必要あり) は重要な技術的課題であった。現在では搾乳ロボット用ビジョンセンサの幾つかは本方式に基づく専用ハードウェアが開発・搭載されている。

GASCOIGNE MELOTTEにおいては、乳頭位置検出のための外界センサ系を一切装備していない点で極めてユニークである。カップ装着機構を構造的に連結した板を臀部に押し当てて乳房位置を推定し、ティーチングされた個体ごとの乳頭位置データに基づいて開口部70mmのカップがエア圧で30mmに狭まって装着される構造を特徴とする。すなわちエアグリッパに類似したライナー構造を採用して、センサ系を有しないシステム構成の中で乳頭位置の微妙な変動を許容するという考え方 (LINDE, 1992) であったが、結果的には普及には至っていない。

DE LAVALの前身となったSILSOEの搾乳ロボットシステム (MOTTRAM, 1991; ROBERTSON, 1994; SILSOE, 2002) は、空気圧シリンダを介したパドルを直接牛の臀部と側部に接触させ (図1-6: STREETら, 1992)、間接的に乳房の概略位置を推定した上でU字型フレーム内に幾何学的に光電素子を配して、この狭い検出領域に乳頭を包囲して位置精査する (MOTTRAM, 1991) という独創的なシステムを構築



※ (Hogewerf, P.H.ら, 1992)

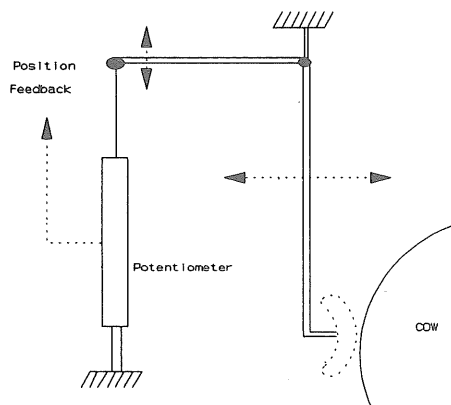
図1-5 PROLIONの乳頭位置検出

した。しかし、結果的にDE LAVALは製品化においては本方式を採用せずにCCDカメラとレーザレンジファインダの併用を導入した。

生物生産ロボットの視覚センサとして一般的なCCDカメラ等マシンビジョンを用いた受動的計測については、乳頭位置検出法に関する基礎研究の対象として取上げられた経緯(GOUWS, 1992)はあるものの、実際の搾乳ロボットに搭載された例は現在のところ存在しない。画像は、ロボットのおかれた環境を全体的に把握する上で効率の良いメディアであり、ロボットの動作する領域全体を俯瞰的に観察して状況を理解する利点がある。しかし、乳頭は特殊な模様のない様な表面を持つ対象であること、入力エネルギーである外乱光の変化を補償するための方策が必要であること、CCDのビデオ信号によるシリアル伝送を行う従来のシステムでは、ビジュアルフィードバックだけを用いての乳頭追従制御を実現するのは実際には困難と思われる。

## 2) ティートカップのハンドリング

既開発の搾乳ロボットシステムにおけるロボットマニ



※ (Street, M.J.ら, 1992)

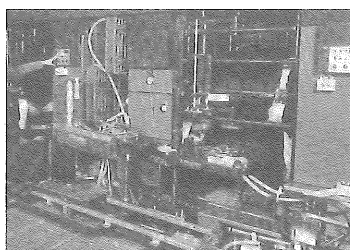
図1-6 牛体位置検出センサの概念

ピュレータ(以下、マニピュレータ)は、前出図1-4にみられるように4本のカップあるいは単一のカップを保持する形式の開ループ型多自由度機構である。前者はPROLION(図1-7-A)やLELY(図1-7-B)、M.A.T.およびGASCOIGNE MELOTTEが属するが、概して後者の方が軽量でコンパクトな機構となりうる。

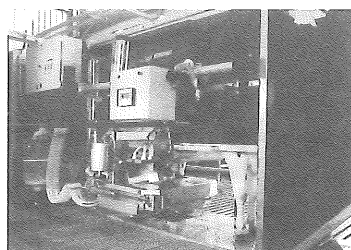
単一のカップ把持形式のエンドエフェクタを採用したシステムでは、DE LAVAL(図1-7-C)やWESTFALIA、GALAXYおよびFALが属する。このうち、WESTFALIAおよびGALAXYの腕構造は、塗装作業等で用いられる汎用知能アームをそのまま流用しており(GALAXY, 2002)、エンドエフェクタのみを独自の設計としている。工業用ロボットを流用する背景には、ロボットのコントローラにPCを利用できるようになって、システムの構築・拡張が容易になった点が挙げられる。汎用知能アームは、そのシステムを機能ごとに階層分けし、各層間のI/F仕様を単純化してユーザに公開するオープンシステムを採用している。よって、パーソナルコンピュータの空スロットに市販のアナログボードを実装し、入出力のソフトウェアをロボットの動作プログラムの中に組み込めば、乳頭位置センサ等の信号の制御が可能となる。

既市販搾乳ロボットの動作形態は、WESTFALIAにおいては3軸の直角座標型を採用し、GALAXYにおいては空間内7自由度の回転関節を用いて乳頭の傾斜に対応したカップ装着を行う等複雑な動きを実現している。

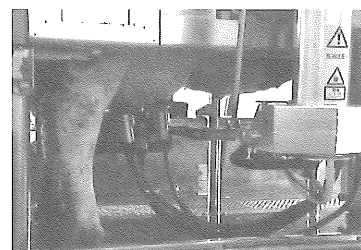
GALAXYのエンドエフェクタの方向は、ピッチ角とヨー角が回転関節と旋回関節の動作に依存する。しかし、その他の搾乳ロボットシステムでは水平面内での運動特性を考慮した水平多関節機構を導入しており、第3章で述べるように"乳頭が存在する空間"での作業を前提として、"カップ装着作業"に必要な本質の運動のみを抽出し、



A. PROLION



B. LELY



C. DE LAVAL

図1-7 搾乳ロボットシステムの外観

ロボットの構造を簡易化しているものと考えられる。よって、用いられるロボット機構は回転関節3～4自由度構成が多い。これらはすべて据置型のロボットであり、牛の蹴りや踏降しに耐えられるよう、機械としての剛性を高めており、可搬重量（ティートカップ1本あるいは4本）に対して本体重量30～50kgfとかなりの重量物であることは容易に推察できる。しかし、牛舎内での移動機能を要する繋ぎ飼い用搾乳ロボットにおいては、後述するようにその独自の使用条件を考慮した機械設計が要求される。

### 3) 機械系設計の指針

機械系の設計開発に当たっては、カップ装着作業を実行するための標準作業域を決定し、この範囲を効率よくカバーし得るマニピュレータのリンク長を検討する必要がある。このためには、作業対象となる乳頭の位置を含む牛体構造を把握しなければならない。また、マニピュレータの運動学的性質は標準作業域の中で論ぜられるべきである。しかし、既往の研究において関連の知見は見当たらない。ロボットによるカップ装着精度を評価する上で、乳房や乳頭の生理学的変化を考慮する必要がある。ロボット搾乳に適応する乳房を選定しても、加齢とともにあるいは搾乳前後に確実にその形態的变化は生じる。こうした観点から、乳頭間距離や形態の変化に対する知識は極めて重要であるが、研究例は少ない。MILLERら（1995）は、乳頭の位置決めをするための外界センサを装備しないGASCOIGNE-MELOTTÉのロボットシステムについてそのカップ装着性能をシミュレートするために、産次別の乳頭間距離や搾乳後における各乳頭間距離の経時的な変動特性を明らかにした。また、HURNIK（1997）は、PROLIONを供試して乳頭の配列や地上高に対する適応性を実験的に検証した。その結果、各乳頭間距離の総計値や乳頭の地上高には適正範囲が存在し、この範囲を外した乳頭に対しては装着の試行回数が有意に多くなる傾向があることを示した。DAVISら（2002）が、ロボット搾乳の適正化に向けた乳頭の形態特性と搾乳性との関連を示した発表は興味深い内容となっている。しかし、搾乳ロボットの機械系または乳頭検出アルゴリズムの構築に当たっては、乳房形態と牛体構造に関わるデータ・知識に基づいて検討され

るべきであるが、その設計論や機械系の諸元の決定方法等は明らかにされていない。

### 1-3-3 既往研究の問題点

繋ぎ飼いと群飼養という飼養管理方式に起因して、牛にとっての搾乳の場が牛固有の生活空間であるか一時的な空間であるかの違いが大きく、それによって機械システムに求められる設計概念は大きく異なる。すなわち、本研究が開始された時点で既往の研究では基本的に放し飼いを前提としていることから、繋ぎ飼い用に適用できる要素技術は極めて少なかった。具体的には、

- 1) 欧州における搾乳ロボット化の開発研究は民間企業主体で進められた経緯があり、機械システム設計のための基礎的数値条件が明示されていない、
- 2) 牛舎内移動を伴うことを前提とした機械システムの構成になっておらず、よってロボットも剛性を確保した"据え置き"型を基本としている、
- 3) ストール内での牛のより大きな動きに対して、実時間で柔軟に対応した牛体捕捉・追従機能を有していない、
- 4) 乳頭位置センサの選定では既往研究の経緯を踏まえてより低コストかつ実時間性に優れた仕様とする必要がある、

といった問題があった。特に上記2) 3)に対応して、移動機能とコストを考慮した機械の軽量化とストール内での牛の自由な動きを許容しつつ、カップ装着は牛の動きに常に追従して牛と機械系との相対位置関係を常に維持するための機械システムの開発が求められる。

そこで、本研究では、

- 1) 牛体構造と乳頭位置の生理学的変動を考慮した機械設計指針を明示する。
- 2) 繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムでは、牛舎内移動機能とマニピュレーション機能を分離させる必要がある。機械系をストール内に移動・固定した後、牛体への確実な追従を図るには牛の動きを捕捉するための移動機能とティートカップ装着マニピュレーション機能を統合する協調制御を確立する。
- 3) 乳頭への良好な追従性を実現するためには、機械の"重量"は最大限考慮すべき事項である。特にマニピュレータは基本的に片持ち梁構造となるため、剛性を高

めようとすれば構造部の質量が大きくなり、制御上不利になる。あくまでも"小型軽量化"を不可欠な条件として各要素技術を確立する。

- 4) マニピュレータ駆動用アクチュエータは、本来機構上あるいは機能的に生体(牛体)に似た柔らかさを備えた低剛性特性が望まれる。ただし、本研究では当面制御の容易性からアクチュエータを選定してマニピュレータシステムへの組み込みを図る。
- 5) 牛の動きに伴ってカップ装着を実現するための作業移動型ロボットとして、作業の基準となる座標の中でロボットの位置を確定する機能、さらに自律化のためには乳頭位置を精査する外界センサが必要である。乳頭位置検出法に際しては、前述の既往研究を参考にしながら、信頼性と軽量化・低コスト化と併せてセンサ信号の実時間処理に適した乳頭位置センサとアルゴリズムを具備する。

以上の概念に基づき、繋ぎ飼いを前提とした「ティートカップ装着の無人化」を達成すべき目標とした。

#### 1-4 本論文の構成

このような背景から、繋ぎ飼いにおける搾乳ロボット技術を開発するための設計指針を提示し、これに基づく機械システム・制御系を構築して、システム全体の牛への適応性を検証することを目的として検討を行った。本論文の構成と各章との関係を図1-8に示す。

本論文は以下の7章からなる。

第1章は本章であり、本研究の背景について言及するとともに、論文の目的と構成について述べる。

第2章および第3章では前章で提起した「繋ぎ飼い牛舎」への適用に向けた搾乳ロボット機械系の設計指標として、牛の側から要求される事項について論ずる。

第2章「ホルスタイン種泌乳牛の乳頭配置と経時的変動」では、泌乳牛を対象としてその乳頭間距離を産次と泌乳期との関連について調査し、評価する。繋ぎ飼い用搾乳ロボットは、その作業計画に当たって個体ごとの生理的特性を考慮するとともに、任意の各乳頭間距離に到達する時間帯(前回搾乳時刻からの適正な経過時間)を予測して搾乳するという作業計画に基づいてロボットを稼動することが可能となる。すなわち、本章においては、泌乳期と産次に対する乳頭間の平均距離、変動幅および泌乳量の影響を解明することにより、ロボット搾乳への適応範囲と機械設計を得ることを目的とする。さらに、搾乳後の時間経過に伴って乳頭の寸法が如何に変動するかを示す。

第3章「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」では、搾乳ロボット作業環境を定量化し、機械系設計の拘束条件を抽出することを目的とする。す

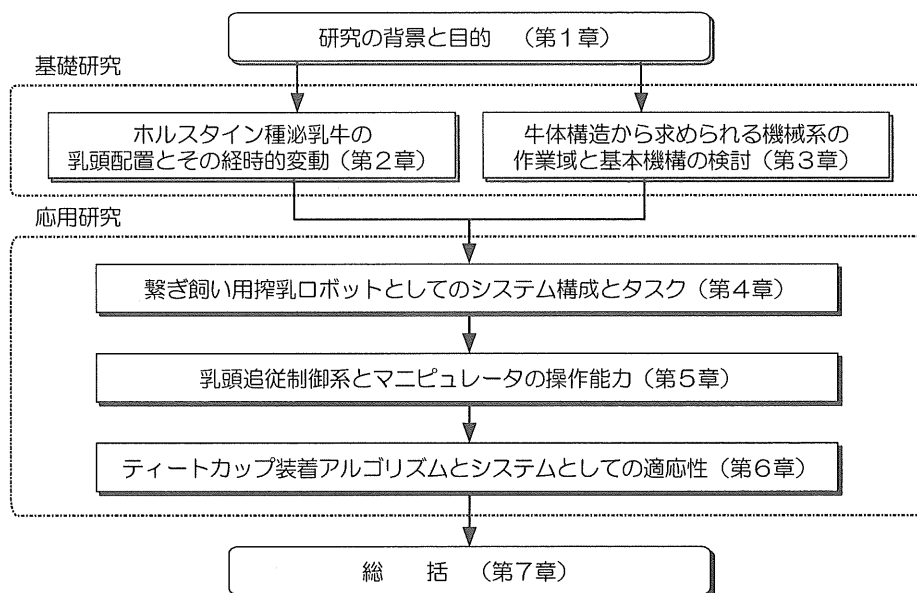


図1-8 本論文の構成

なわち、繋ぎ飼ストール空間等不利な条件を考慮しつつ、牛体各部位の物理的寸法を明確にした上で、ここで得られた知見を基にロボットの形態的な最適化を図ることをねらいとする。これらにより、ティートカップ装着作業を行うために必要な運動を実現するために機構の形式、リンクと関節の数やリンク長を選定して実用的なロボット機構を検討する。

第4章「繋ぎ飼用搾乳ロボットのシステム構成とタスク」では、第2、3章で提案した設計指針に基づいて開発した無制御で牛体の動きに追従する機構を基軸とする機械システムについて述べる。牛の自由な動きを規制することなく、牛の動きに機械系を同期させるための独自の機構に自動搾乳ユニットを連結することによって、牛と機械系の平面的位置関係を維持し、実時間で乳頭に追従可能な機械システムの各構成要素とシステム全体の基本的な制御アルゴリズムについて提案する。

第5章「乳頭追従制御系とマニピュレータの操作能力」では、試作マニピュレータの動特性について検討する。特に、周波数応答法により動特性を解明した上で追従制御系を確立し、乳頭の挙動特性からその妥当性について論じる。また、第3章で提案した牛体への干渉を回避するためのマニピュレータの姿勢拘束条件に基づき、逆運動学問題を明らかにするとともに、設定した標準作業域のX-Y平面内における操作能力の観点からロボットシステムの有効性を定量化する。

第6章「カップ装着アルゴリズムとシステムとしての適応性」では、主にZ軸方向におけるティートカップのマニピュレーションについて検討する。乳頭の微妙な傾斜角や時々刻々と位置変動する乳頭先端にカップ中心を勘合させるアルゴリズムを開発し、カップ装着精度の向上を目指す。また、装着過程において内部データベースの当該牛個体乳頭位置座標に基づくエンドエフェクタの目標位置への誘導に向け、個体ごとの乳頭位置教示操作について述べる。

さらに、構築したロボットシステム全体の搾乳牛への適応性について、実搾乳試験を通してロボットの動作性と装着時のカップ内圧力変動の観点からその有効性を検証する。これらを踏まえて更なる開発改良を要する今後の

展望について提案する。

第7章「総括」では、本研究を通して得られた成果をまとめ総括する。

## 第2章 ホルスタイン種泌乳牛の乳頭配置とその経時的変動

### 2-1 緒言

搾乳ロボットシステムを効率的に稼働させる上で最も重要なポイントの一つは、ロボットによるティートカップの自動装着率である。自動装着の成否は、乳頭位置の検出精度やロボットの動作性など機械的特性に依存するが、また一方では牛の気質や乳房・乳頭の位置・形態などの形態的特性によっても左右される（ALLENら、1992）。特に、後者の物理的特性としては乳頭の地上高さ、傾斜角度および隣接する乳頭間距離が挙げられる。一般に、これら諸形質の観点から一定の基準を設けてロボット搾乳対象牛群を選抜する方策が講じられるが、こうした基準に適合する乳房を選抜しても、長期的な時間の経過に伴って明らかにその形態的变化は生じる。乳房・乳頭の外形が発育・妊娠・泌乳・搾乳によって大きな変化を示すことは、一般に知られているところである（鈴木ら、1959；MILLERら、1995）。搾乳ロボットシステムを設計・評価するに当たっては、乳房や乳頭のこうした生理的要因による形態的变化を考慮しなければならない。

ロボットの機械的構造にもよるが、産次と泌乳段階あるいは搾乳時間帯に起因する乳頭間距離は、直接ティートカップの自動装着率に影響を及ぼすことが想定され、ロボットシステムを導入した現場から指摘されることも現実にある。しかし、これまでにロボットシステムとの関連で検討された乳頭間距離の研究成果は極めて少ない。

HURNIKら（1997）は、現在市販されている搾乳ロボットシステムを供試した装着試験結果からその適用可能な平面的乳頭間距離の範囲を報告している。また、MILLERら（1995）は開発段階の別のシステムを用いた評価試験の結果、乳頭間距離の適用範囲を明らかにするとともに、搾乳後の乳頭間距離についてその日内変動を示している。しかし、搾乳ロボットシステムの設計指針の作成に向けては、産次ごとの泌乳段階の進行にとも

なう乳頭間距離と泌乳量の変化,あるいは泌乳段階ごとの搾乳後の時間経過に伴う乳頭間距離の変動については一定の知見が得られていない。前者については,市販の搾乳ロボット支援管理システムから得られる運用データを用いて各乳頭の座標値の変化が解析されつつある(喜田ら,2001;小宮ら,2001)。一泌乳期を通じて,乳頭間距離の変動に伴うカップ装着率あるいは試行回数 of 推移についてまだ体系立てた検討はされておらず,今後の解析の発展が期待される。後者については, MILLERら(1995)の報告以外に現時点では見当たらない。機械システムの設計開発あるいは市販機の性能評価は,長期的観点で分娩後の時間経過,すなわち泌乳段階に伴う乳頭間距離の変動の推移と併せて,短期的には搾乳後の乳頭間距離の日内変動を把握する必要がある。

現在市販されている搾乳ロボットシステムの多くは,ティートカップ装着前の乳頭探索過程で,予めシステム管理コンピュータに記録されている個体ごとの乳頭位置座標データベースに基づいてロボットを動作させている(ROSSINGら,1992;ARTMANN,1997)。筆者らが目的とする,繋ぎ飼用システムも同様のアプローチを採用することとしている。特に,本システムが放し飼用搾乳ロボットと大きく異なる特徴の一つは,牛の自発的行動に因らずに機械的に搾乳作業計画を遂行できる点にある。このとき,牛の泌乳生理との関係で個体ごとに期待される乳期乳量と乳頭間距離をもとに搾乳回数 of 増減を設定することによって,頻回搾乳を行うロボットシステムの有効利用と安定した装着性能を発揮することが期待できる。そのためには,前述の泌乳段階による長期的な乳頭間距離の変動と乳量との関係や日内変動をシステム設計に反映させることが重要である。

本章では,産次の異なる泌乳牛を供試して一泌乳期を通しての乳頭間距離の変動と併せて,搾乳後の時間経過に伴う乳頭間距離の変動を泌乳段階ごとに測定を行う。その特徴を明らかにすることによって,機械系設計評価のための指針を検討した。

## 2-2 材料および方法

### 2-2-1 分娩後経過に伴う乳頭配置の変動調査

本測定調査は,千葉県畜産センター酪農試験場において,1995年6月から1996年12月までの19カ月間を通し

て毎月1回中旬を目処に朝夕各々の搾乳直前に実施した。

同試験場では,朝夕の搾乳時間帯は各々8:00と16:00からとなっており,16時間-8時間の不規則搾乳である。また,同試験場では牛の頸部を固定せずに牛体後方をチェンのみで規制するライホルム形式の飼養形態を導入している。

測定項目は,前乳頭間距離(以下,DF),後乳頭間距離(同DR),左側乳頭間距離(同DLS)および右側乳頭間距離(同DRS)とした。なお,本章で示す乳頭間距離は,各乳頭孔をそのまま水平面に射影した際の隣接する乳頭間を結ぶ直線距離を意味する。

測定調査は,当該対象牛のストール内にて行った。また,牛の姿勢については佇立状態で後肢飛節部の内側間隔が30cm程度離れている状態を基本として,牛体側方からコンベックスを用いて測定した。これを大きく下回る場合には,強制的に開脚させることがあった。測定開始直前まで横臥休息していた個体については,より正常な乳頭間隔に復帰するのを期して起立後約30分の経過を待った。測定者は調査期間中を通して同一とした。

調査期間中,同試験場で飼養されているホルスタイン種泌乳牛全頭を測定対象とし,総計延べ1350(朝・夕各々675)頭のデータが得られた。この中には,3~5カ月間測定した後に淘汰された個体も含まれるが,これについてはデータ解析の対象からは除外した。調査対象牛の産次は初産から6産であったが,2乳期にわたって測定した個体もいた。結果として,初産18頭,2産11頭,および3産以上12頭計41頭をデータ解析の対象とした。

調査対象牛の年齢や産次,分娩経過日数および日乳量等の履歴については同試験場の乳牛管理データを利用した。各乳頭間距離の変化のデータは分娩後経過月ごとに算出され,初産・2産・3産以上の牛群データ全てについて平均化した。統計処理は分散分析法(吉田,1982)によって行った。

### 2-2-2 搾乳後経過に伴う乳頭配置の変動調査

本調査は,前項と同様に千葉県畜産センター酪農試験場において,前項の調査2-2-1の期間中1996年1月と5月および10月の計3回の測定調査を実施した。

測定調査ではホルスタイン種泌乳牛15頭を供試し,

この供試牛の泌乳ステージを前期（20～50日）、中期（145～175日）および後期（240～270日）の3期に分類して測定を行った。供試牛の内訳は、2産6頭、3産6頭、4産2頭および6産1頭計15頭であった。測定項目は調査2-2-1と同様の内容、すなわちDF、DR、DLSおよびDRSとし、これら諸項目の測定を朝搾乳直前・直後、1、2、4、6および8時間後の計7回とした。

乳頭間距離の変化率は測定時刻ごとに求めて、泌乳前期・中期・後期のデータ全てについて平均化した。得られたデータは最小二乗法によって分析した。

## 2-3 結果

### 2-3-1 分娩後経過に伴う乳頭配置の変動

乳房下方からの全景を図2-1に示す。図2-2には分娩

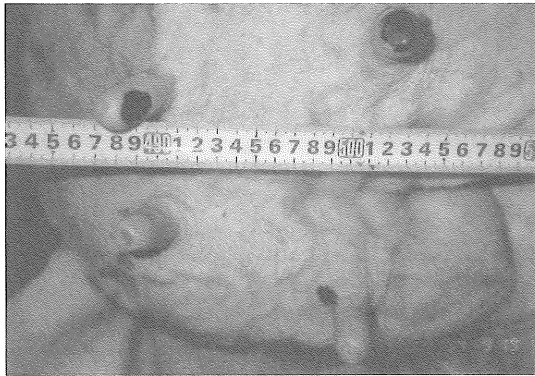
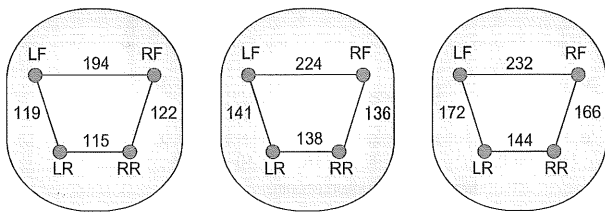
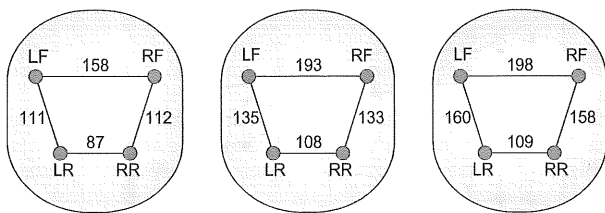


図2-1 下方から見た乳房

#### Morning



#### Evening



Parity 1

Parity 2

Parity ≥3

図2-2 産次ごとの乳頭間距離(朝搾乳と夕方搾乳前)  
LF=left front, LR=left rear, RF=right front & RR=right rear  
(Parity 1: n=18, Parity 2: n=11, Parity ≥3: n=12)

直後の朝夕各々の搾乳前における乳頭間距離の平均値を初産、2産および3産以上に分類して示す。

産次の違いは、全ての平均値において高い有意差が認められた ( $P<0.01$ )。産次が進むと各々の乳頭間距離は次第に広がる傾向であり、各乳頭孔を結ぶと概ねDFを底辺とする台形状を呈していることがわかる。

朝搾乳前のDRは、初産では115mmであったが、3産以上では144mmに増大した。朝搾乳から8時間経過した夕方搾乳前では、初産では87mm、3産以上では109mmであった。また、朝夕にかかわらずDFはDRの1.6～1.8倍、DRSあるいはDLSの1.2～1.6倍の範囲であった。DRSやDLSも同様に産次とともに増大する傾向であった。同一個体においてDRSとDLSはある程度不均衡は認められるが、その差は $13 \pm 10$ mm (Ave. ± Stdev.) と小さかった。分娩直後における朝搾乳前の乳頭間距離を外周長 (DF+DR+DRS+DLS) (Ave. ± Stdev.) で示すと、初産牛では $551.9 \pm 50.4$ mm、2産では $597.5 \pm 140.1$ mm、3産以上では $710.1 \pm 98.6$ mmであった。夕方搾乳前においては、それぞれ $467.7 \pm 54.0$ mm、 $537.5 \pm 154.8$ mmおよび $616.0 \pm 85.7$ mmであった。

産次ごとの各乳頭間距離の標準偏差を表2-1に示す。図2-2と表2-1を用いて変動係数を求めると、朝と夕方の測定値には大きな差は認められなかったものの、ばらつきの程度は個体間で大きかった。DRは全ての産次において他の部位よりも変動係数が大きく、25～30%の範囲であった。これに対して、DFとDRSおよびDLSはほぼ15～25%であった。なお、変動係数はすべての

表2-1 産次\*1ごとの各乳頭間距離の標準偏差

Parity	Distance <sup>2</sup>	Morning (mm)	Evening (mm)
1	DF	23.8	22.8
	DR	18.8	19.7
	DRS	16.4	16.6
	DLS	18.1	15.9
2	DF	46.2	42.0
	DR	31.6	30.0
	DRS	21.6	19.3
	DLS	24.2	18.4
≥3	DF	52.6	48.4
	DR	38.4	35.4
	DRS	27.5	24.0
	DLS	29.0	26.1

\*1 : Differences among parity means were significant for all traits, both morning and evening-milking ( $P<0.05$ )

\*2 : Distances between teats: DF=front, DR=rear, DRS=right side, DLS=left side. (Parity1 : n=18, Parity2 : n=11, Parity ≥3 : n=12)

部位において朝よりも夕方の方が変動係数が高かった。産次ごとの分娩後経過に伴う乳頭間距離と泌乳量の変化を図2-3に示す。分娩直後の日乳量については、分娩5日後から3あるいは5日間の平均値を用いた。前述のようにDRSとDLSの差異は十分小さいと判断し、図ではDLSを省略した。図中の各乳頭間距離の縮小曲線を推定する指数関数式と曲線を決定するパラメータの回帰係数と決定係数について朝と夕方に分けて表2-2と表2-3に示す。

朝と夕方いずれにおいても、乳頭間距離は泌乳段階の進行とともに縮小したが、その縮小割合は初産牛と経産牛で明らかに異なった。各部位の縮小は回帰係数よりすべての産次を通じてDRが最も急激な割合を示し、続い

表2-2 泌乳段階<sup>\*1</sup>における各乳頭間距離の縮小曲線と決定係数(朝搾乳)

Parity	Distance <sup>*2</sup>	RC <sup>*3</sup>	CD <sup>*4</sup>
1	DF	$y=100e^{-0.0426x}$	a
	DR	$y=100e^{-0.0754x}$	b
	DRS	$y=100e^{-0.0075x}$	c
2	DF	$y=100e^{-0.0458x}$	a
	DR	$y=100e^{-0.0624x}$	b
	DRS	$y=100e^{-0.0316x}$	c
≥3	DF	$y=100e^{-0.0462x}$	a
	DR	$y=100e^{-0.0694x}$	b
	DRS	$y=100e^{-0.0265x}$	c

\*1 Differences between first parity and means of later parities were significant for all traits (P<0.05).  
 \*2 Distances between teats: DF=front, DR=rear, DRS=right side (=DLS),  
 \*3 Regression coefficients, x: month postparturition  
 a-c : values in each parity without common superscript differ significantly (P<0.01).  
 \*4 Coefficient of determination, \*:P<0.05, \*\*:P<0.01

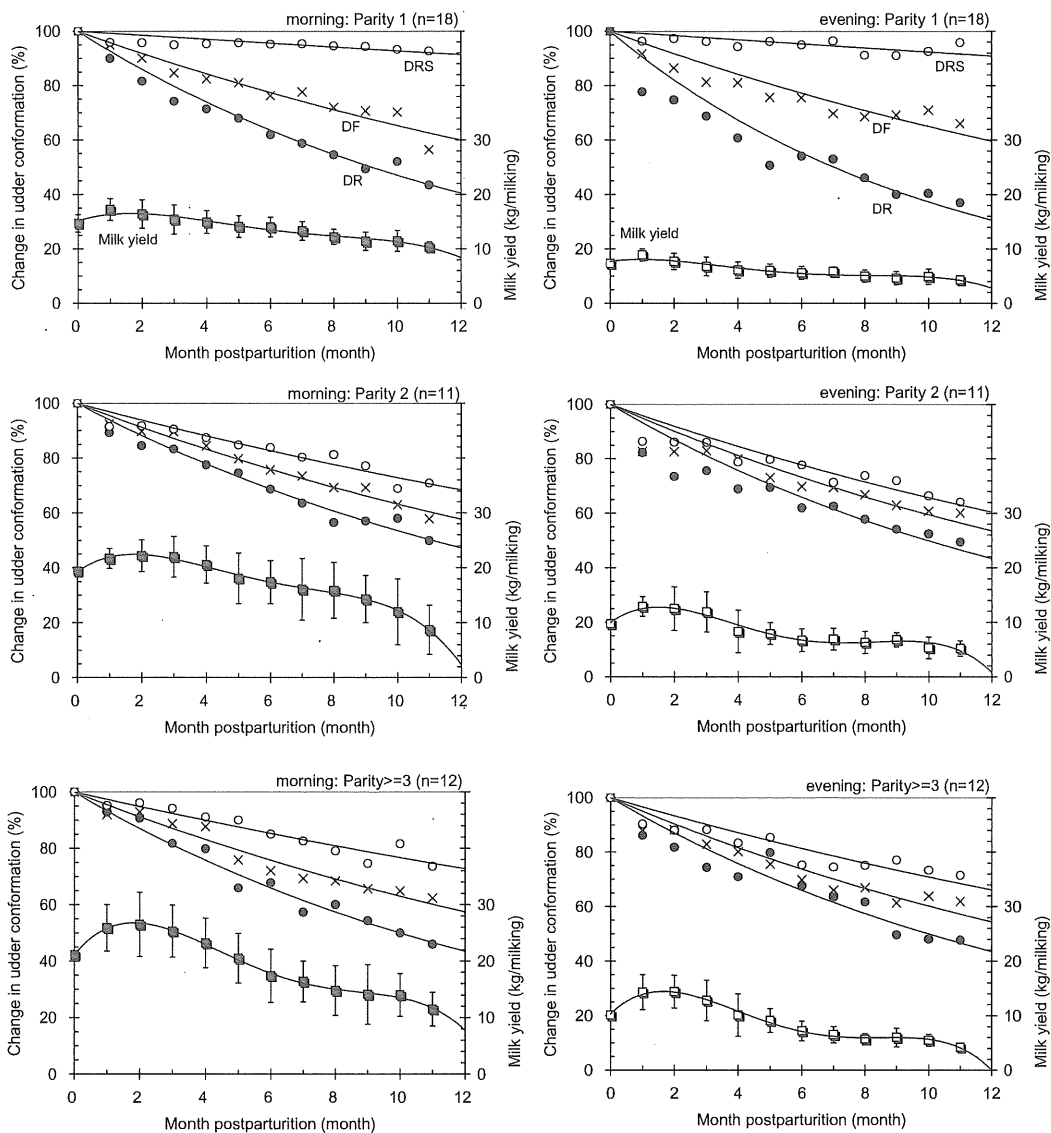


図2-3 産次ごとの分娩後経過に伴う乳頭間距離と泌乳量の変化



てDF, DRS (=DLS) の順であった。泌乳後期におけるDRは、産次に拘わらず分娩直後に比較して45~60%と半減した。

DRS (=DLS) の縮小割合においては、初産と経産牛との間で有意な差を認められた ( $P<0.01$ )。初産の場合では一泌乳期を通じて10%程度の僅かな縮小に対して、経産牛では30~35%であった。なお、2産と3産以上の両者の縮小割合は統計的に有意 ( $P>0.05$ ) ではなかった。

乳量はいずれの産次においても分娩後増加して、分娩後約6週目から2カ月目で最高日乳量に達し一般的な泌乳曲線と同様の経過を辿るにも拘わらず、各乳頭間距離は指数関数的に縮小する傾向を示した。また、産次が進むにつれて総乳量も増加する傾向が認められた。乳量は産次によって大きく異なり、特に初産牛と経産牛の差は明らかであったが、全体として日乳量は増加することが確認された。なお、産次が進行して乳量が多くなると、泌乳初期間の乳量の割合が特に高くなる傾向にあった。

### 2-3-2 搾乳後経過に伴う乳頭配置の変動

朝搾乳前の乳頭間距離を100としたときの、搾乳後の各乳頭間距離の平均値は表2-4のとおりであった。搾乳による各乳頭間距離の縮小率は、泌乳ステージ間で有意な差は認められなかった。部位別にはDRが搾乳前の43~55%と最も顕著な縮小を示し、DFは15~36%、左右の乳頭間距離を平均したDSは12~25%であった。搾

表2-3 泌乳段階<sup>\*1</sup>における各乳頭間距離の縮小曲線と決定係数(夕方搾乳)

Parity	Distance <sup>*2</sup>	RC <sup>*3</sup>	CD <sup>*4</sup>
1	DF	$y=100e^{-0.043x}$	a 0.82**
	DR	$y=100e^{-0.0986x}$	b 0.90**
	DRS	$y=100e^{-0.0079x}$	c 0.31*
2	DF	$y=100e^{-0.052x}$	a 0.86**
	DR	$y=100e^{-0.0695x}$	b 0.85**
	DRS	$y=100e^{-0.042x}$	c 0.85**
≥3	DR	$y=100e^{-0.0507x}$	a 0.91**
	DF	$y=100e^{-0.0693x}$	b 0.92**
	DRS	$y=100e^{-0.0344x}$	c 0.79**

\*1 Differences between first parity and means of later parities were significant for all traits ( $P<0.05$ ).

\*2 Distances between teats: DF=front, DR=rear, DRS=right side (=DLS),

\*3 Regression coefficients, x: month postparturition

a-c : values in each parity without common superscript differ significantly ( $P<0.01$ ).

\*4 Coefficient of determination, \*: $P<0.05$ , \*\*: $P<0.01$

表2-4 泌乳期別<sup>\*1</sup>にみた搾乳後の乳頭間距離の変化率

Lactation stage	Distance <sup>*2</sup>	Change <sup>*3</sup>
Early-	DF	71.2 ± 7.86 <sup>a</sup>
	DR	54.1 ± 8.90 <sup>b</sup>
	DS	79.7 ± 3.31 <sup>c</sup>
Mid-	DF	73.3 ± 7.20 <sup>a</sup>
	DR	56.4 ± 4.56 <sup>b</sup>
	DS	82.1 ± 3.73 <sup>c</sup>
Late-	DR	78.6 ± 5.52 <sup>a</sup>
	DF	58.4 ± 3.04 <sup>b</sup>
	DS	82.2 ± 4.66 <sup>c</sup>

\*1 Differences between first parity and later means were significant for all traits ( $P<0.05$ ).

\*2 DF=front, DR=rear, DS=average of right & left side.

\*3 Mean ± S.D. [mm] (n=15)

a-c : values in each parity without common superscript differ significantly ( $P<0.05$ ).

乳直後の実測値を0%としたときの経時的変化率を図2-4に示す。

各乳頭間距離は、時間経過に伴って直線的に拡張する傾向を示し、搾乳による縮小率が最も大きいDRの拡張率は他の部位に比較して明らかに大きく、次いでDF (<DR/2.2), DS (<DR/2.5) の順であった。直線回帰によれば、搾乳12時間後にはほぼ完全な乳頭間距離の復帰(拡張)は期待できるものの、DRはいずれの泌乳段階でも他の部位に比較してやや低い傾向であった。また、泌乳段階の進行に伴って、DRの搾乳後拡張率(日内変動率)は有意に小さくなった ( $P<0.05$ )。DFとDSの日内変動は泌乳初期と中期の間で有意な差 ( $P<0.05$ ) があつたが、中期と後期においては明らかでなかった。

## 2-4 考 察

本章では一泌乳期を通じた乳頭間距離と日内変動の推移を記録し、ロボット搾乳機に及ぼす影響と設計開発に当たって考慮すべき事項を検討した。すなわち、物理的なロボット機械系が牛に歩み寄るべき一つの重要因子として、乳頭の配置と関連づけて考えたかったからである。ロボット機械系を新規に設計開発する上で、この形態的寸法を把握することは重要である。併せて、ロボットのエンドエフェクタがティートカップを把持し、対象乳頭へアプローチする際には時間経過に伴う位置変動を考慮する必要がある (ALLENら, 1992; ROSSING, 1992)。

乳頭配置が前後左右対称であることは乳牛の体型審査の乳器得点においては重要な項目である。しかし、クラ

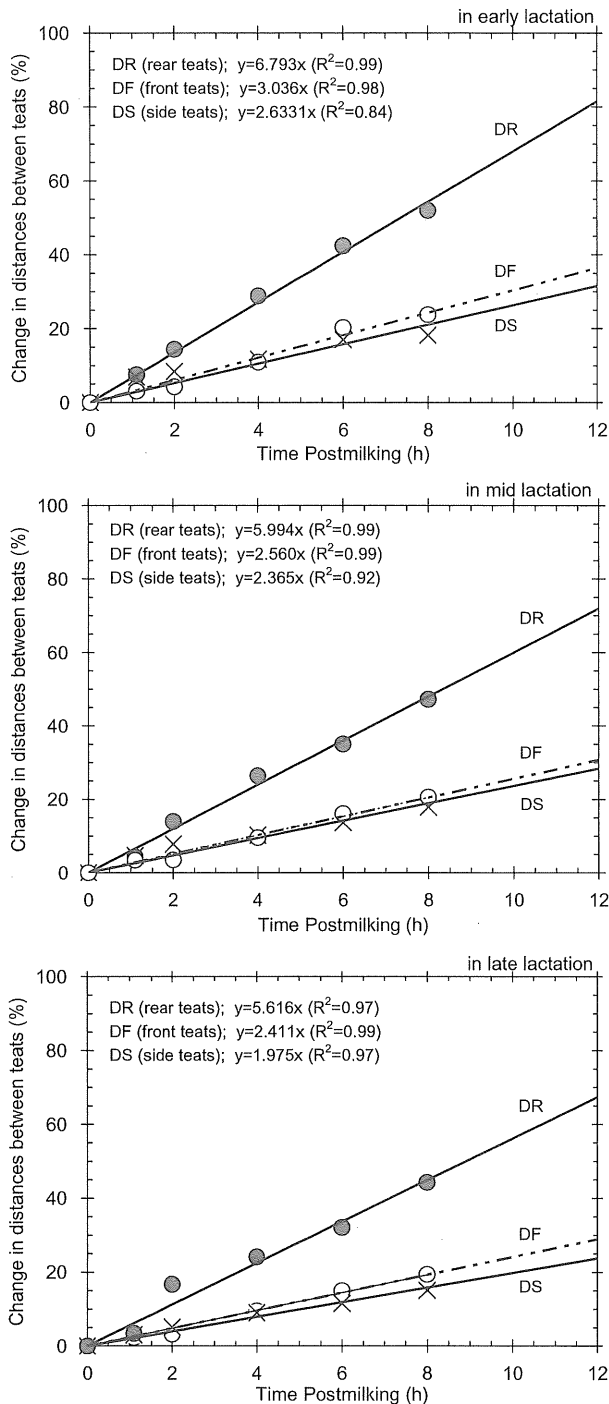


図2-4 各泌乳期別にみた時間経過に伴う乳頭間距離の変化

スタ全体をマニピュレータの手先に装備したPROLIONの性能評価をしたHURNIKら(1997)は、ロボット装着の成否(自動装着率)との関連性は低いと結論付けている。今回の調査結果においても、左右の前後間距離の差異は最大40mmの個体が確認されたものの、統計的には $13 \pm 10\text{mm}$ が得られ、酪農現場では乳頭配置の非

対称性はロボット搾乳にとって大きく問題視されることはない。しかし、各乳頭間距離の外周長が400~600mmを外れる個体を対象とした場合には、ティートカップの自動装着にはより多くの試行回数を要する(HURNIKら, 1997)。

また、MILLERら(1995)は、PROLIONシステムと同様に4本のティートカップをエンドエフェクタに固定装備したGASCOIGNE MELOTTEを想定したカップ装着シミュレーションの結果、330mm以上の前乳頭間距離には自動装着が困難であると判断した。いずれの機械システムも、4本のティートカップは“module”としてマニピュレータ先端に固定されていることから機械系とカップとの間に大きな自由度はなく(図1-4参照)、適用範囲が限定される設計であったことは否めない。また、マニピュレータの構造上、多様な動作の要求に困難を伴うことは容易に想定される。

本研究の対象とする繋ぎ飼用搾乳ロボットを設計するに当たっては、牛舎内移動型機構とする必要があることを第1章で述べた。必然的に機構の軽量化が求められるとともに、4乳頭の外周長や左右間の距離偏差に規制されないためには、マニピュレータと搾乳機系を物理的に連結せずに分離した形態(図1-6の“single cup”)とするのが望ましい。これによってマニピュレータ本体をより簡易でコンパクトな機械構造にできる可能性は広がり、多様な運動とタスクを付与できる。

今回の調査結果から推察すれば、泌乳段階の進行につれて自動装着の難易が変化する可能性を示唆している。図2-2に示した搾乳前の各乳頭間距離は、MILLERら(1995)の報告と類似した結果となった。分娩直後の3産以上の牛群では、朝搾乳時では各乳頭間距離の外周長は平均710mmを示した。夕方搾乳時でさえも外周長は平均610mmを越え、供試牛12頭中11頭が前述の適用範囲を超えた乳頭間距離の拡張を示した。また、初産牛における分娩10カ月後の乳頭間距離の外周長は $423 \pm 68\text{mm}$ (朝搾乳時)であった。さらに、泌乳量は産次によって異なり、特に初産牛と経産牛ではその差は大きく、泌乳の持続性やロボット動作の効率を考えた場合には、牛個体ごとの乳期乳量に対するロボット搾乳回数設定は重要性を増す。

これらの結果から、搾乳ロボットシステムでは産次や

泌乳ステージに応じて搾乳回数の増減を図るなどの搾乳作業計画によって、前述総計値はほぼ適正な設定範囲となり、こうしたパラメータ等をもとに設計されたシステムのカップ装着性は高い信頼性を有すると考える。こうした機械的な搾乳計画は、牛の自発的行動に依存しない繋ぎ飼いの場面で有利性を発揮することが期待される。

ROSSINGら（1992）は、牛群の5～15%の牛はその乳頭配置や乳房形状によって自動装着が困難であると報告している。言い換えれば、ロボット搾乳に当たっては乳房の形態的特性あるいはその変化によって対象牛を選定する必要性を意味する（ARTMANN, 1992；BOTTEMA, 1992）。これは、概して当該ロボットシステムのティートカップを把持するエンドエフェクタの機械的構造、特にカップの配置によって適用可能な乳頭配置、あるいは装着しやすい配置の領域が存在することに起因する。これまで述べた平面的な配置と併せて、乳頭先端の地上高や付着傾斜角の程度が重要な意味を有することも推察できる。これらは、HURNIKら（1997）もカップ自動装着の成否との関係を実験的に示唆している。なお、これまでの搾乳ロボットの中にはその機械技術が成立する条件として、後肢を規制するための工夫（DUCK, 1992；MARCHALら, 1992；STREETら, 1992）が搾乳ストール床面に施されていることが前提となっているものもある。この設計は、放し飼い用システムならではの有効なロボット動作環境の整備条件である（MOTTRAM, 1992）が、著者らが目的とする繋ぎ飼い用ロボットシステムへの導入は、ストールそのものが牛の居住空間である以上基本的に不可能であろう。よって、機械設計に対する発想の転換が必要となる。

ロボット搾乳の対象範囲を拡大するためには、

- 1) 乳頭の傾斜角に対応してティートカップ孔を乳頭端に嵌合させるために、多様な運動ができるようにマニピュレータの関節自由度を設定する、
- 2) 個々のティートカップをロボット機械系と独立させることによって、カップ相互のより高い機動性を確保し、乳頭配置に左右され難い機械設計を行う、
- 3) 狭隘な後肢間空間に進入して牛体への干渉を回避しつつ、乳頭探索・マニピュレーションを行うことができる、などの必要がある。

図2-1～2-3に明らかなように、特に初産牛の場合で

は泌乳期に伴って大きく縮小するDRがカップ装着を妨げる要因になりやすいと考えられた。一方で、体軸方向での位置（DRS、DLS）の変動においては、初産牛の場合、泌乳後期でも分娩時の10%程度の縮小に留まり、経産牛に比べて明らかに小さい傾向が認められた。こうしたパターンを機械制御設計、特に乳頭位置データベースの構築に反映させてロボットによる牛体軸および牛体幅方向での乳頭探索領域を限定することによって、後肢や対象外の乳頭を誤認識する機会を低減できる可能性がある。これを具現化する意味で、時間経過に伴う乳頭配置の変化を調査した。

左側または右側乳頭間距離は、搾乳前後の変化は小さく、搾乳以降の拡張率は緩慢である一方で、後乳頭間の拡張率は極めて高かった。搾乳間隔に応じたロボット動作アルゴリズムとして、乳頭探索時において牛体軸（X）方向よりも牛体幅（Y）方向での前回搾乳時の座標を基点とした手先誘導を優先した方法が考えられる。

乳頭間距離が小さい泌乳後期においては、搾乳回数を減らすとともに搾乳時間帯を固定することによって一定距離以上のDRが期待でき、またALLENら（1992）は教示乳頭座標データを数日間有効に使用できるとしており、これらは自動装着率を確保する上では重要性を帯びてくる。

HURNIKら（1997）は、自動装着性能との関係において乳頭先端の床からの高さを一つの指標として取上げている。乳頭先端が高い位置にあるほど装着に要する回数が少ない傾向にあり、また斉一な乳頭高さを有する牛ほど同様に装着しやすい傾向があることを示している。乳房下方からの機械動作は、乳頭の平面的配置のみならず鉛直空間でのクリアランスにおいても一定の条件が求められる。この点については、第3章で考察する。

ここで、繋ぎ飼い用ロボットの有利性である“計画的搾乳”において考慮すべき点は、泌乳生理との関係である。分泌した乳は、乳腺胞腔から乳管へと移動し、搾乳されるまで主として乳管内に貯留されるが、乳が溜まるにつれて乳房は拡張し、乳房内圧が上昇することで分泌が抑制される（新出, 1990；LINDEら, 1992）。抑制される時期は、牛の能力や乳房の大きさによって異なるが、およそ搾乳後8時間位と言われる。したがって、8時間間隔の3回搾乳の場合は12時間間隔の2回搾乳よ

り分泌の抑制が少ない分だけ乳量が多くなると考えられ、一般的なロボット導入効果としても頻回搾乳に伴う乳量増加に関する多数の報告（例えばHOGEWERFら、1992；KNIGHT、1992；ARENDZENら、2000）が挙げられている。これらは搾乳ロボットを用いた「搾乳作業計画」を立てる上で重要である。すなわち、搾乳間隔が8時間以上にならないような設定が牛の生理からみて望ましいと理解できる。ただし、前述したように乳量との関係と併せて検討する必要があるが、搾乳回数の増加の効果は乳腺の退行を抑制して泌乳の持続性を高めることができる。また、泌乳100日以降に搾乳回数を増加しても泌乳の持続性を高める効果はほとんどない。泌乳の持続性の向上は、分娩直後から40日以上継続して搾乳することにより、搾乳回数を1日2回に変えても泌乳の持続性を高める効果はその後の泌乳段階に残る。その度合いは3回搾乳を行った日数によって異なる（新出、1990）。各産次とも、分娩後日数に応じた搾乳回数を設定することによって1回当たりの乳量を平滑化するとともに、乳房容積は十分発達していないものの、初産時からの頻回搾乳に伴って遺伝的に持っている能力を発揮し、次回分娩以降の泌乳性を向上することが期待される。これらは、ロボットによる適正な搾乳計画により牛の潜在的泌乳能力を誘引する効果を示唆する。また、搾乳量の75%を得るのに実際の搾乳時間の50%を要しているに過ぎず、このことは残乳を搾ろうとする搾乳プロセスの大部分は非効率的であることを示している（HOGEWERFら、2000）。このことからしても、搾乳量に見合う機械的な搾乳回数設定は、繋ぎ飼い用搾乳ロボットの有利性を追認する大きな要素であるが、これは搾乳前後の処理に要する時間をも考慮した搾乳ロボットの処理能力との関わりにおける問題といえる。すなわち、牛個体の泌乳生理に応じた搾乳作業計画の企画に際して、乳期乳量との関連と併せて、特に図2-3に見られるように分娩後8カ月で分娩時に比べて60%に縮小する後乳頭間距離に対して、ティートカップ装着精度を低下させない効率的な搾乳回数が検討されるべきである。

本章では、同じ産次や泌乳期ごとの平均値を用いて考察したが、測定の際に後肢の開脚度合いによっては、特に後乳頭間距離は10～20mm程度変わる場面が多く観察された。また、これまで述べた生理的反応による変化

よりも、ALLENら（1992）やARTMANN（1997）が指摘するように、牛の横臥によって受ける変化の方が大きい場合があることが予測される。よって、ロボット搾乳前にある推定式から個体の乳頭位置データを求めることは避けなければならない。時間の経過に伴う乳頭位置座標の推定には、個体ごとの値や絶対値を得ることに問題を残しているが、個体ごとに算出された比率の平均値は個体差の影響を除くという意味で信頼性は高いと考えられる。また、本章で示した経時的な位置変動はその傾向を知るためには十分に役立つものであろう。

なお、横臥による影響を考えた場合、繋ぎ飼い方式で搾乳ロボットを稼働させる際に所定の搾乳時刻の一定時間前に対象牛を起立させておく方を検討する必要がある。「2-2 材料および方法」で述べたように、測定前に横臥休息していた個体に対しては強制的に起立させた後約30分の時間経過を待った。実験的な検証はしていないものの、期待される乳頭間距離に復帰するにはこの程度の時間は必要と思われた。

現在普及あるいは開発途上の搾乳ロボットシステムにおいては、予め対象牛の乳頭形態情報をシステム管理コンピュータに教示・記録し、外界センサによる乳頭探索時の前処理作業では記録データを参照する方式を導入している。こうした個体管理データベースの構築に関連した報告（DUCK、1992；LINDEら、1992；MARCHALら、1992；STREETら、1992；八谷、1995）は数多くあり、この個体別データベースの導入によってカップ自動装着の効率化が期待できる。特に、形態情報の一つである乳頭位置の座標データは、定期的に更新されることによって信頼性の高いデータとなりうる。今回得られた結果は、こうしたティートカップ装着前処理作業の方策の有効性を追認するものでもあろう。放し飼い用システムで信頼性の高い乳頭位置データを得るためには、前述のように何らかの開脚装置によって後肢の間隔を確保する方策は堅実であると考えられる。こうした手法を導入することによって、個体ごとの乳頭位置に関するデータの再現性が期待できる。

以上、産次や泌乳段階および日内の時間経過に伴う乳頭間距離の変動を測定調査し、これら諸要因と関連させてロボット機械系を含むシステム設計評価について考察した。今後は、こうした要因等を踏まえて泌乳に関する

モデル解析など、市販搾乳ロボットシステムの性能を評価検討することも必要であろう。

## 2-5 摘要

搾乳ロボットシステムの設計評価に向けて、産次と泌乳段階に対する乳頭間距離の変動と時間経過に伴う日内変動について測定し、考察した。

- 1) 各乳頭間距離は、産次の進行に伴って有意に増大 ( $P<0.01$ ) し、前乳頭間距離は後乳頭間と前後乳頭間に対して各々1.6~1.8倍と1.2~1.6倍であった。分娩後2カ月間にわたって見られる乳量の増加に関わらず、全ての乳頭間距離は分娩後日数の経過とともに縮小した。特に後乳頭間距離は他の部位に比較してその変動は大きく、泌乳後期には分娩直後に比して45~60%まで縮小する傾向となった。また、初産牛における泌乳段階の進行に伴う後乳頭間距離の縮小に配慮したロボット機械系の設計の必要が認められた。左右の乳頭間距離の不均衡は、ロボット搾乳にとって機械系の機構次第では問題とはならない。
- 2) 搾乳後の乳頭間距離は、時間経過とともに直線的に増大したが、泌乳後期では乳頭間距離の復帰の度合いが有意に小さくなった ( $P<0.05$ )。頻回搾乳を前提とした場合、搾乳ロボットの乳頭探索アルゴリズムとして、牛体軸方向よりも牛体幅方向での前回搾乳時の座標を基点とした手先誘導を優先した方法が有効と考えられた。
- 3) 乳頭間距離が小さい泌乳後期においては、搾乳回数を減らして搾乳時間帯を固定することによって、一定間隔以上の後乳頭間距離が期待できるとともに、教示乳頭座標データを数日間有効に利用できる可能性を示唆した。

## 第3章 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

### 3-1 緒言

従来の工業用ロボットの大部分は、高出力かつ高効率を目的としたものであり、安全性は「対象と機械とは空間を共有しない」ことによって確保されるものであった。

しかし、搾乳ロボットの対象となる牛体および乳頭は規格化された工業製品と異なり、その位置や寸法・形状

等が多様で全く同じものはないことが挙げられる。ところが、このような対象に対しても、人間は高度な認識能力、柔軟な腕および手を自在に活用してティートカップを装着し、搾乳を行うことができる。これを機械作業に置き換えるに当たって、装着に要する作業精度と円滑さのみならず、"牛にストレスを与えずに接近してティートカップを装着する"ことは重要である。したがって、搾乳ロボット機械系を設計するためには、まず牛と機械とが共存する空間での安全性について検討する必要がある。ティートカップのマニピュレーションは動的障害物である四肢との干渉・衝突を可能な限り回避し、与えられた作業環境内の物体位置を把握した上で、機械系設計の適正化を図る必要がある。

近年の欧州および日本国内で開発されてきたシステムは、すべて放し飼いへの適用を前提としたものであるが、著者らが目的とする繋ぎ飼い牛舎への適用を前提としたシステムにおいては、そのロボット動作環境は前者に比して明らかに不利な条件が存在する。その最も大きな要因は、個別ストールの存在と、そこでの牛体位置の自由度の大きさである。さらに、ロボット本体に牛舎内を移動するための機能を付加する必要がある。繋ぎ飼いに向けた搾乳ロボット機械系を設計するために、牛体の動きの自由度を損なうことなく、ストール空間等不利な諸条件を考慮しつつ、牛体各部位の位置・寸法をもとにロボットの基本機構を検討する。なお、ここで提示した設計指針は繋ぎ飼いのみならず、放し飼い用搾乳ロボット機械系の設計にも共通して供しうるものとする。

### 3-2 繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムの設計概念

繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムでは、機械系がストール後方から繋留牛に接近し、牛体の特定部位を捕捉するとともにミルク・真空ラインとの自動着脱動作が要求される。この機械系の牛への接近動作過程では、牛の背腰上方空間の敷設レールに沿って走行・進入することを想定する。

特定部位を検出した後の乳頭への接近動作過程は、概して1) 牛体の任意位置から乳房位置を推定、2) 個体別の乳頭配置データベースによるロボットマニピュレータ（以下、マニピュレータ）の粗位置決め、3) 乳頭個別の位置精査、などの段階を踏む。これまでに開発され

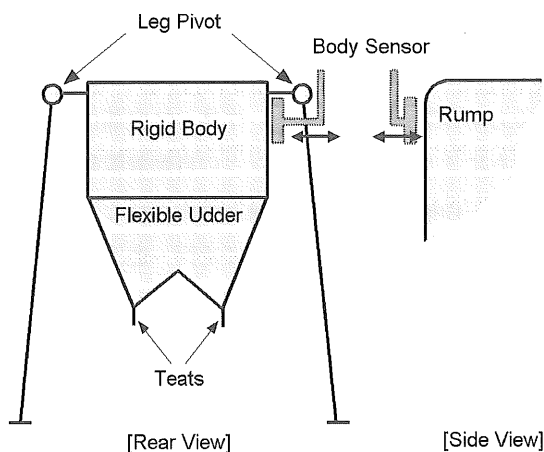
た搾乳ロボットシステム (ROSSING, 1997) においても基本的には上記過程を踏襲しており、特に STREETら (1993) の設計では、以下の前提で牛体位置検出システムを構築している。ロボット動作対象である乳房と乳頭は柔軟な構造物ではあるが、牛体は四肢によって支持された剛体モデル (図3-1) であり、安定した懸架システムに懸垂している。牛体が動けば、乳頭も何らかの動的関係により挙動を示すという概念に基づき、臀部と腹側部に長さ150mm、直径25mmのパドルを空気圧シリンダを介して直接接触させることで牛体への追従動作を図った。

しかし、この牛体接触センサはストール上方の定位置に懸垂されていることから、あらゆる大きさの牛に対して設計時に想定する最適位置に接触するとは限らない。すなわち、センサの接触点が腰から尻までの弾性的生体部位である場合には、本センサは牛体の大きな動きとともに生体が受ける圧力次第では変形を伴うことにより、正確な位置の認識ができない可能性がある。結果として、予め構築した乳頭配置データベースの再現性が薄れることとなる。よって、牛体位置検出追従機構は牛体後躯において外部からの圧迫に対し、最も変形量の小さな部位を選択・捕捉する必要がある。ここでは、特に坐骨端と腰角部を捕捉することが望ましいと考えられる。

さらに、これまでに開発された搾乳ロボットシステムにおいては、牛体位置検出追従機構とマニピュレータを分離した方式を採用している。牛体の特定部位を接触式あるいは非接触式外界センサにより検出し、計算機を介

してマニピュレータ動作にフィードバックすることから、位置誤差に応じた動作を行うには必然的に遅延時間を伴う。さらに、牛体の大きな動きに対する機械系の追従動作は困難を極める。放し飼い用搾乳ロボットシステムの専用ストール内では、いずれも牛体位置あるいは姿勢を規制してロボット動作環境を整備することはできるが、繋ぎ飼い方式においては困難である。牛への十分な追従動作を確保できない限り、円滑なカップ装着作業が困難であるばかりか、牛と機械系双方の平面的位置関係を維持できない場面においては、装着後或いは搾乳中のカップが脱落することも想定される。

こうした諸条件に対して、本システムではストール上方に敷設したレールに牛体位置検出追従機構を懸垂させるとともに、本機構にマニピュレータを含む自動搾乳ユニットを機構的に連結する方策を採用する。よって、本システムを構成する機械要素はストール面に設置することなく、その上方空間で動作する。これによって、本システムは牛体位置検出から搾乳後のティートカップ自動離脱までの一連の作業過程を通じて、自動搾乳ユニットの座標原点と牛体との水平面上での相対的位置関係を確定し、牛体が急激にあるいは大きく動いても牛と機械系の平面位置関係は概ね維持されるとともに、ほぼ実時間で牛体追従動作は可能になる (八谷ら, 2001) と考えられた。なお、マニピュレータについては単一のティートカップを把持するエンドエフェクタ、その直上に乳頭位置検出センサを装備した機構として、任意の位置からティートカップを取り出す方式を想定した。



※ (STREETら, 1993) を一部改変

図3-1 牛体位置検出センサの概念

### 3-3 設計指針の策定に向けた体尺測定調査

#### 3-3-1 材料および方法

体尺測定調査は、1995年7月12～14日にかけて農水省畜産試験場 (現畜産草地研究所：つくば)、同年9月8～12日に農水省草地試験場 (現畜産草地研究所：那須)、同月13～20日には栃木県酪農試験場、10月20～25日には帯広畜産大学、および12月5～9日にかけては千葉県畜産センター酪農試験場の計5場所において実施した。これらの場所で飼養されているホルスタイン種泌乳牛計111頭を測定対象とした。供試牛は初産から8産と広い範囲にわたり、その内訳は初産37頭、2産32頭、3産20頭、4産以上22頭であった。泌乳ステージや泌乳量

等については、特に限定しなかった。

測定調査は、朝搾乳終了1時間後（9時）から夕方搾乳30分前（16時）までの時間帯とした。なお、乳頭配置の測定は本来搾乳直前に実施するべきではあるが、ここでは主に任意の牛体部位との相対位置関係を調査することを目的としたので、この測定時間帯で差し支えないものと判断した。

測定は図3-2に示す試作ストール内に佇立させた状態で、コンベックスを用いて行われた。試作ストールには、手動で調節可能な牛体側方位位置規制パドル（片側ストローク：150mm）と後方位位置規制パドル（ストローク：200mm）、濃厚飼料繰り出し装置と飼槽および屋根を装備した。外寸は、全長3,000×幅1,500×高さ2,250mmである。ストール床面の寸法は幅1,100×長さ2,000mmであり、その床表面をダイヤ目としたが、測定時には蹄の滑り防止を目的としてオガ屑等を撒いた。

以下の項目にしたがってデータを取りまとめた。

a. 水平体長, b. 全幅, c. 前肢後面から後肢前面までの水平距離, d. 坐骨端から前乳頭先端までの投影水平距離, e. 尻長, f. 腰角幅, g. 坐骨端から後肢前面までの投影水平距離, h. 後肢内側間距離, i. 背腰の最高地上高, j. 腹の最低地上高, k. 前後乳頭先端の最低地上高, l. 各乳頭間距離（前後左右）, m. 乳頭長さ（同）, n. 乳頭直径（同）の14項目とした。なお、乳頭直径は先端から25mm上の部位を対象とした。

牛がストール内で肢の踏み換えや蹴り等行動が落ち着かない場合には、測定を中断して待機した。また、姿勢を維持させるために餌を給与しなかった。対象牛の年齢、産次、分娩後経過日数および日乳量等の履歴については

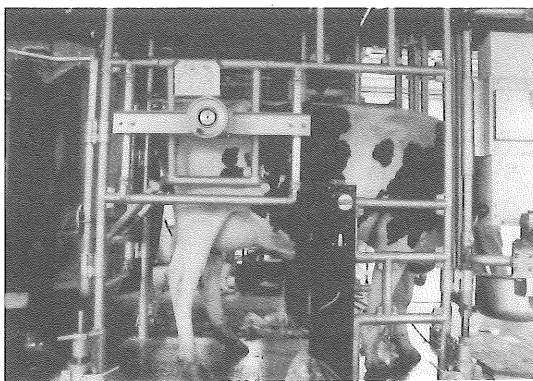


図3-2 牛体寸法測定

当該場所の乳牛管理データを利用した。なお、本章において乳頭間距離とは前章と同様に、隣接する各乳頭孔を水平面に射影して結んだ直線距離とした。

### 3-3-2 結果および考察

表3-1に搾乳ロボット機械系の諸元および作業領域の決定指標とするための主な計測値を示す。

#### 1) 牛体位置検出に関わる空間領域

牛体を捕捉するための牛体位置検出追従機構を設計する上で、牛の水平体長、全幅、体高、尻長および腰角幅を参考指標とする。

得られた各部位の測定結果の範囲は、水平体長が140.0～181.0（中央値：160.0）cm、全幅は56.0～80.0（同68.0）cm、体高は130.0～155.0（同146.0）cmであった。なお、ここでいう水平体長とは肩端部から坐骨端部までの水平距離を示す。特に、牛体位置検出追従機構が牛体に対して直接接触する部位を坐骨端と腰角として、これに関わる寸法として尻長が42.5～55.0（同49.5）cm、腰角幅は50.5～64.0（同58.0）cmであった。腰角は、背腰とほぼ同等の高さで側方に適度に突出しており、後躯を左右から挟みこむと特定の部位として機械的に認識でき、また坐骨端とあわせて変形しにくい部位であると判断した。

牛の個体差を考慮した適用範囲を定め、坐骨端と腰角を確実に保持して牛体本体をマニピュレータの作業座標系と設定することによって、自由度の大きなストール内での牛体位置と乳房位置を推定できる。また、ここで固定された座標系のもとでマニピュレータの運動は記述されることとなる。

#### 2) 腹部下方における平面空間領域

本論文の全章を通じて、X軸とY軸はそれぞれ牛体軸方向とこれと直交する体幅方向であると定義した。X座標は坐骨端を原点座標として牛体前方に向けて+方向とし、Y座標においては牛体上方からみて体軸中心から左側を+、右側を-方向とする。また、Z座標は地上面を原点とする。

表3-1に示すように、マニピュレータの動作が許容される空間領域は、X軸方向においては前肢後端面から後

表3-1 ホルスタイン種泌乳牛の体尺測定結果

Measurements	Statistics	Min.	25 <sup>th</sup>	Median	75 <sup>th</sup>	Max.
		percentile				
----- (cm) -----						
Level body length		140.0	155.0	160.0	167.0	181.0
Body width		56.0	65.0	68.0	72.0	80.0
Rump length		42.5	46.0	49.5	51.5	55.0
Hip bone width		50.5	56.0	58.0	60.0	64.0
Hip height		130.0	143.0	146.0	149.0	155.0
Teat tip height	Front	37.0	46.0	50.0	56.0	63.0
	Rear	35.0	43.0	48.5	54.0	61.0
Abdomen height		47.0	53.5	57.0	60.0	65.0
Distance between fore and hind legs		79.0	105.0	113.0	123.0	139.0
Inside width between hind legs		8.0	15.0	19.0	23.0	40.0
----- (mm) -----						
Teat length	Front	58.8±7.2				
	Rear	47.9±5.8				
Teat diameter	Front	25.2±3.7				
	Rear	25.6±3.4				

\* Based on 111 observations (one per cow) which consist of 37 in parity1, 32 in parity2, 20 in parity3, and 22 in parity≥4

肢前端面までの水平距離であり、79.0~139.0cmとかなり広い範囲に分散したが、機械系の設計においては最小値である79.0cmを目標値として採用した。また、Y方向の上限値は、乳頭への接近動作過程でカップを把持するエンドエフェクタまたは各アームが腹部下方の横方向にはみ出さないことを条件として、全幅の75%点(72.0cm)を上限とした。

図3-3に坐骨端を基準とする4乳頭の相対位置のばらつきをX-Y平面上に示す。前乳頭と後乳頭のX座標(Mean±S.D.)は、それぞれ400±45mmと305±47mmであった。また、前乳頭と後乳頭のX座標の左右差は、13±7mmと9±5mmであった。しかし、左右の

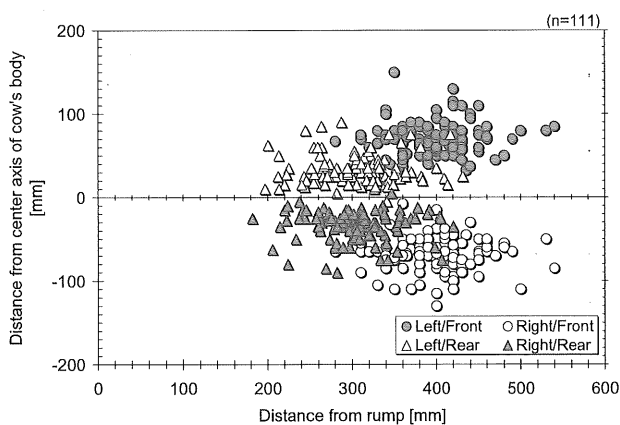


図3-3 坐骨端を基準とした4乳頭の位置

乳頭間距離はそれぞれ104±25mmと104±26mmと近似しているため、乳頭端で構成される図形を高さが均等な台形状とみなした。

供試牛の当該乳期において、各乳頭間距離が最も拡張したときの数値を基にマニピュレータの標準作業域を決定するために、得られたデータについて前章で提示した分娩後および時間経過に伴う乳頭間距離の変動回帰に基づいて、全個体について分娩後の朝搾乳前における各乳頭間距離を推定した。

表3-2は当該乳期における分娩後の乳頭位置座標を推定した結果の5%点と95%点を示す。本研究では、5%点~95%点のデータを機械設計指針の参考値とした。

表3-2 分娩後における前後乳頭の5%値と95%値\*

Co-ordinates	Percentile Values	
	5%th [mm]	95%th [mm]
X-Axis/Front teats**	343	524
X-Axis/Rear teats***	202	375
Y-Axis/Front teats****	±69	±161
Y-Axis/Rear teats*****	±27	±144

\* These values were calculated as teat placement for pre-milking of post-parturition according to the linear regression analysis reported in "CHAPTER 2".

\*\* Distance from rump to front teat,

\*\*\* Distance from rump to rear teat,

\*\*\*\* Distance from center axis of cow's body to front teat,

\*\*\*\*\* Distance from center axis of cow's body to rear teat.



乳頭の存在領域は、X座標では前乳頭の95%点である524mmから後乳頭の5%点である202mmの範囲、Y座標では前乳頭位置の95%点である±161mmの範囲を一つの目安と考える。よって、標準作業域の決定に際しては、X座標とY座標をそれぞれ(524-202)mmと2×|±161|mmとして概略350×350mmの区画として採用すれば十分であろう。

次に、坐骨端を基準とする後乳頭と後肢前面までの投影水平距離を図3-4に示す。後肢前面のX座標は80～390(260±66)mmの範囲に散在するが、全供試牛のうち27%の個体の後乳頭が後肢前面と同等、あるいは後方に位置しており、後肢側方からは後乳頭の存在を確認し難いあるいはできなかった。ここで、マニピュレータの経路生成に当たって、牛の腹部下方空間において後肢の配置から衝突の可能性が低い部分を抽出するために、動的障害物となる後肢のX座標の上限を400mmと設定した。例えば、PROLIONシステムでは、動的障害物である後肢の位置規制とあわせて前肢を高さ150mmのステップに載せることにより、後肢の間に隠蔽されている後乳頭を前方に露出させる。これによって、ロボットによる乳頭探索やティートカップ装着を容易にする等、その動作環境を整備することの有用性が指摘されている(HURNIK, 1992; MOTTRAM, 1992; ARTMANN, 1997; ROSSINGら, 1997)。しかし、前章で述べたように、繋ぎ飼いや向けのシステムでは本手法の導入は困難である。さらに、強制的な開脚装置によ

る姿勢決めも、家畜を対象とする機械システムとして馴染まない。

前出表3-1によれば、乳頭高さにおける後肢内側間距離は80～400mmと個体によって開脚程度は大きく異なるが、ここでは後肢内側における安全領域の上限として25%点(150mm)を採用した。前述の後肢X座標上限値400mmから牛体後方にかけて、Y座標±75mmの空間の大きさを拘束条件として、後肢への干渉を回避するためのエンドエフェクタの寸法、および最適な関節構造と制御方法を検討する必要がある。

### 3) 腹部下方における鉛直空間領域

図3-5に産次ごとの乳頭地上高の頭数分布を示す。乳頭地上高は370～630mmと広い範囲に分布し、その中央値は500(25%点:460, 75%点:560)mmであった。産次別では初産が549±49mm, 2産は507±49mm, 3産は479±52mm, および4産以上では450±58mmと産次の進行に伴って乳頭地上高は有意(P<0.01)に低くなった。

家畜行動の面からは、老齢牛については特に脚部や肢蹄等の問題に起因してロボット搾乳システムへの自発的な移動が抑制されることから、ロボット搾乳対象から淘汰される例がある(HURNIK, 1992)。一方、こうした行動面とは別の観点で、既市販ロボットシステムを供試したHURNIK(1997)やMILLER(1995)は、産次の増加すなわち乳房位置の低下に伴って装着の難度が高まるとして、乳房の形態的变化への機械開発側からの対応を図る必要性を指摘している。

ロボット機械系、特にエンドエフェクタ部の機構設計に当たっては、カップ装着後の搾乳過程に支障を来さない程度に、地上高がより低い乳頭に対してもロボット装着を可能とする必要がある。乳頭地上高は、カップ本体の構造寸法およびロボットが装着過程で必要とする上下の空間領域に配慮し、地上高に対する設計下限値を350mmと設定した。下限値を低く設定するほどロボット機械系とは別に、ティートカップ本体とショートミルクチューブ等の接続・配管には何らかの工夫が必要となるのは自明である。

鉛直方向の直動関節のストロークは大きく確保すれば対象牛の選抜範囲が大きくなり、乳頭地上高から求めら

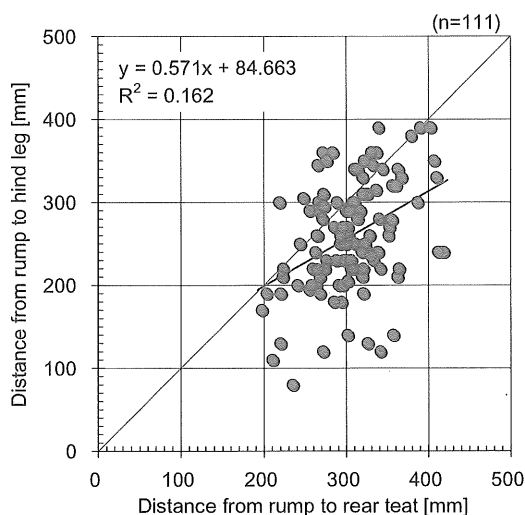


図3-4 坐骨端を基準とする後乳頭と後肢のX座標

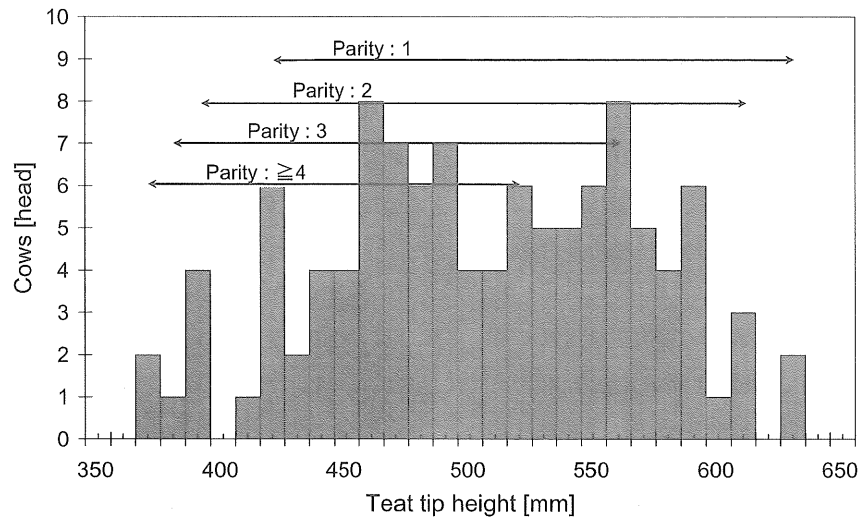


図3-5 産次別の乳頭地上高

れる淘汰の基準を緩和できる。しかし、むやみに鉛直動作を司るアクチュエータの仕様を過大に要求することは、質量の増大とともに動作性に影響を及ぼすことが懸念される。ここでは、マニピュレータの鉛直（Z軸）方向のストローク必要量は「上記最高値－設計下限値」とし、280mmに設定した。

図3-6に乳頭地上高と腹部下面高さの分布を示す。乳頭位置が高いほど腹部下面高さとの偏差が有意に小さくなる傾向（ $P < 0.05$ ）であり、特に若産次の牛においては顕著であった。その偏差は-30～160mmに分布し、その中央値は60（25%点：20、75%点：90）mmと概して腹部の方が高く位置するが、腹部面の方が乳頭先端よりも低い、あるいは同等の個体が全供試牛の12%確認

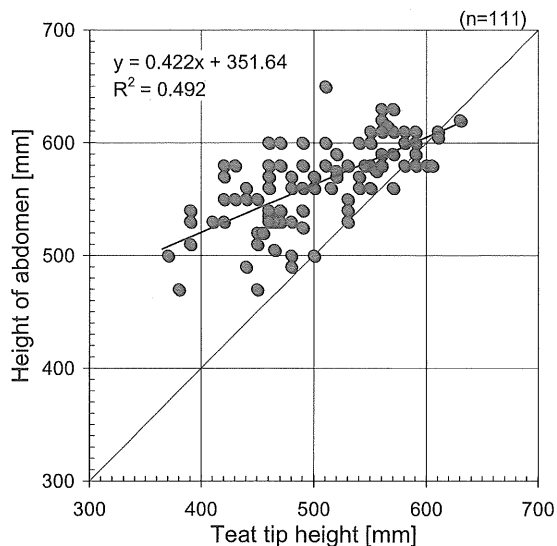


図3-6 乳頭と腹部の地上高

され、そのすべてが初産であった。

ここで、ロボットの台座を腹部側方に設定すると、初期状態（各関節変位=0）から作業対象とする乳房までの移動経路は、明らかに腹部下方での動作となる。よって、若産齢の牛にみられる上記傾向を考慮して、乳頭位置に到達する過程で、マニピュレータが腹部に擦れるなど不用意な接触を回避する必要がある。この観点から側方または下方向からのアクセス性の良い多関節型マニピュレータ形式にするとともに、鉛直面内での各リンクの取付け位置とアクチュエータの配置に留意するべきである。

### 3-4 マニピュレータの作業可能な空間領域と設計指針

#### 3-4-1 マニピュレータ動作領域の限定

前述のように、マニピュレータの経路生成計画はその作業空間である乳房下方の構造に基づくべきであり、四肢や腹部など牛体への干渉を回避する必要がある。そこで、マニピュレータの形態や大きさに拘わらず、牛体下方において四肢および乳房の配置から、衝突の可能性が低い安全な空間を抽出したX-YとX-Z平面領域（図中×で包囲）を図3-7に示す。

動作領域のX座標の設定では、坐骨端を基準点とする400mm地点から肢間距離の最小値（=790mm）を加味した1190mm、Y座標では体幅の75%点（=±360mm）を示した。これに後肢で規制される狭隘な作業空間を加えた。Z軸方向では、設計下限値350mmにストローク

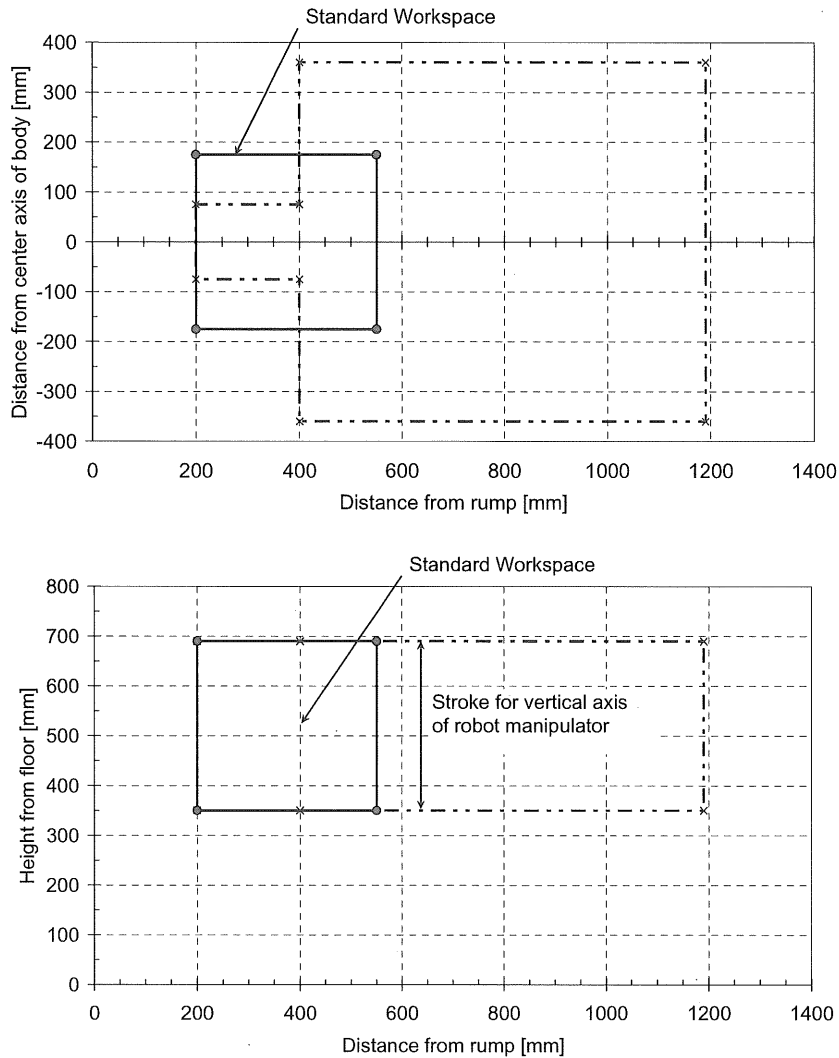


図3-7 カップ装着マニピュレーションの標準作業域モデル

必要量280mmと乳頭の長さ（表3-1）を加えて、690mmを上限值とした。標準作業域（図中Standard Workspace；MAKINO, 1985）である4乳頭の存在領域（X座標；200～550mm, Y軸座標；±175mm）と後肢の存在領域（X座標；200～400mm, Y座標；±75mm～）は部分的に重複しており、干渉の可能性が高くなる。なお、標準作業域はティートカップを把持したエンドエフェクタが空間内で常に任意の姿勢で効率良く移動すべき領域であり、任意姿勢作業域（Dexterous Workspace, KUMARら, 1981）に十分包含されている必要がある。

マニピュレータは、初期状態（各関節変位=0）から各アームを展開して、標準作業域に侵入するまでの動作過程では、手先が自由に姿勢変更できる比較的広い空間が与えられている。また、マニピュレータは、基本的に

この空間で経路上の主要な点に基づいて位置フィードバックによるPTP制御（point-to-point control）によって次々と位置決め制御を実行することができる。ただし、運動過程でマニピュレータ関節の移動範囲が部分的に大きくなるように、各アームで動作を分担して展開する必要がある。

### 3-4-2 マニピュレータの冗長自由度とその利用

人間の上肢は7自由度を有し、手でものを掴んで固定するだけなら6自由度あればよいことを考えれば、冗長な自由度の一つを有する。しかし、この冗長性ゆえに上肢は柔軟性や汎用性を増していると考えられる。一方、3自由度作業空間内で任意の位置にマニピュレータの手先を移動させる場合には、位置決め自由度3、姿勢決め自由度3の合計6を必要とする。

表3-1に示したように、前後の乳頭地上高は若干の偏差は認められるものの、乳頭先端部はほぼX-Y同一平面内に位置するものと判断し、またその前方に後肢等障害物が存在することはほとんどない。こうした対象に対しては、水平方向に運動能力の優れたマニピュレータ機構が向いている。すなわち、要求される平面的なマニピュレーションでは位置決め2と姿勢決めの自由度1、合計3個の回転関節とし、これに装着動作を行うための直動の自由度1（位置決めのX-Y平面に直交するZ軸方向）を加えた構成で、対応は可能である。ここで、前述の牛体位置検出追従機構を含むロボット機構全体の概要を図3-8に示す。

図のように、牛体後躯を保持する機械系にマニピュレータを連結することによって、ロボット機械系のベースは牛の動きと連動することとなり、よって運動学解析のために設定される座標系となる作業座標系とリンク座標系は、概ね同一の座標系と考えることができる。システム制御用ホストコンピュータは絶対座標系での計算は行わず、エンドエフェクタに装備した外界センサ情報から相対的な位置情報に変換し、操作量の演算を行うこととなる。なお、機械系の詳細については第4章で述べる。

作業座標系は、ロボットの作業を記述するための座標系であり、作業対象である乳頭が位置する牛体本体に設定される。本システムにおいては、作業座標系が一旦設定されれば牛体位置検出追従機構による捕捉が解除されない限り、基本的には変更されないものと仮定する。すなわち、図にあるように牛体位置検出・追従機構と物理

的に連結または懸架したロボット機構において、そこに装備したティートカップを乳頭下方に移動させる作業では、カップを把持するまでのアームの運動に設定された座標系と、把持後カップを移す目標場所に設定された座標系は同一の座標系として記述することができる。

ここで、図に示すようにロボットの作業環境としてある二つの作業座標系 $\Sigma_r$ と $\Sigma_h$ を考え、 $\Sigma_h$ の $\Sigma_r$ に対する位置と姿勢について考える。

$\Sigma_h$ の $\Sigma_r$ に対する位置は、ベクトル ${}^r p_h$ により表す。 ${}^r p_h$ は $\Sigma_r$ の原点 $O_r$ より $\Sigma_h$ の原点 $O_h$ に至るベクトルで、 $\Sigma_r$ に対して

$${}^r p_h = [{}^r p_{hx}, {}^r p_{hy}, {}^r p_{hz}]^T \tag{3.1}$$

と成分表示することができる。ここで、左肩の添字“ $T$ ”はベクトルを表示する座標系を表す。

$\Sigma_h$ の $\Sigma_r$ に対する姿勢は、単位ベクトル ${}^r n_h$ 、 ${}^r o_h$ 、 ${}^r a_h$ により表す。 ${}^r n_h$ 、 ${}^r o_h$ および ${}^r a_h$ はそれぞれ $\Sigma_h$ の各軸、すなわち $x_h$ 、 $y_h$ および $z_h$ 軸方向の単位ベクトルで、各ベクトルは $\Sigma_r$ に対してそれぞれ

$${}^r n_h = [{}^r n_{hx}, {}^r n_{hy}, {}^r n_{hz}]^T \tag{3.2}$$

$${}^r o_h = [{}^r o_{hx}, {}^r o_{hy}, {}^r o_{hz}]^T \tag{3.3}$$

$${}^r a_h = [{}^r a_{hx}, {}^r a_{hy}, {}^r a_{hz}]^T \tag{3.4}$$

と成分表示される。 ${}^r n_h$ は ${}^r o_h$ と ${}^r a_h$ の外積により

$${}^r n_h = {}^r o_h \times {}^r a_h \tag{3.5}$$

と計算することができる。なお、 ${}^r o_h$ と ${}^r a_h$ の間には

$${}^r o_h \cdot {}^r o_h = 1 \tag{3.6}$$

$${}^r a_h \cdot {}^r a_h = 1 \tag{3.7}$$

$${}^r o_h \cdot {}^r a_h = 0 \tag{3.8}$$

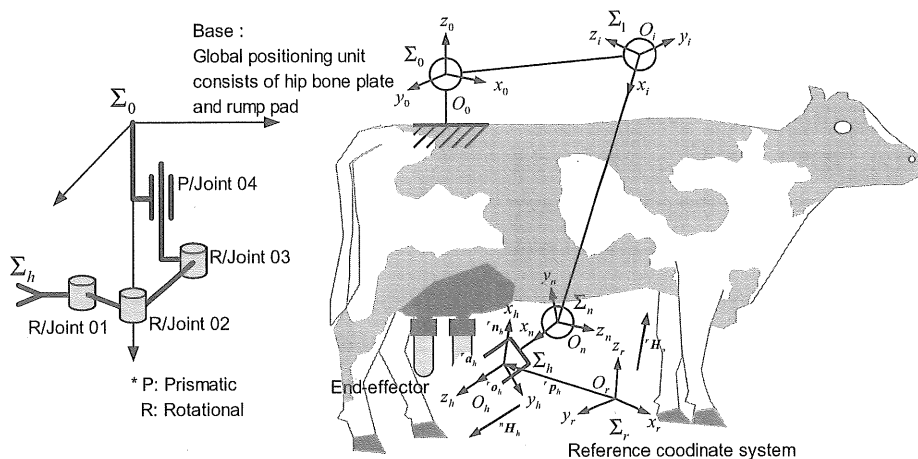


図3-8 自由懸垂の牛体位置追従機構とこれに連結したXY平面2自由度(位置決め2, 姿勢決め1)+Z軸位置決め1自由度を有するマニピュレータ機構と座標系

なる関係が成り立つ。なお、 $\cdot$ はベクトルの内積を表す。したがって、ベクトル $n_i$ ,  $o_i$ および $a_i$ の9成分のうち独立な変数は3個である。これより、座標系の姿勢は3個のパラメータで表現できることとなるが、本ロボットシステムではエンドエフェクタの位置、姿勢、速度、加速度および角加速度より関節変数の位置、速度および加速度を求める逆運動学問題が主たる問題となる。これについては、後述する。

マニピュレータ本体は、Z軸方向における厳密な位置決めは不要である。なぜならば、乳頭端とマウスピース面（ティートカップライナー上面）との距離が数mm離れていてもカップへの真空圧適用によって強制的に吸引されることが挙げられる。ただし、この作用は乳頭とマウスピースが接触しない場合を前提とする（SCHILLINGMANN, 1993）が、乳頭がマウスピース面で軸倒れを起こさずに、横ずれを与えて位置的誤差を補償するコンプライアンス機能を付加する必要がある。よって、搾乳ロボットに要求される位置決めはX-Y平面の2次元で十分であるが、KLOMP（1990）によればその精度は $\pm 5\text{mm}$ 以内である。

「3-2」の設計概念で述べたように、繋ぎ飼い用ロボットの基本構造として、エンドエフェクタはカップ単独を把握して個別の乳頭を検出する機構を想定している。図1-4に示したように、“single cups”形式の方が“module”形式よりも、地上高が各々異なる乳頭に対してもカップのマニピュレーションはより柔軟性を有すると考えられる。

図3-9に示すように、X-Y平面内を動く3個の回転関

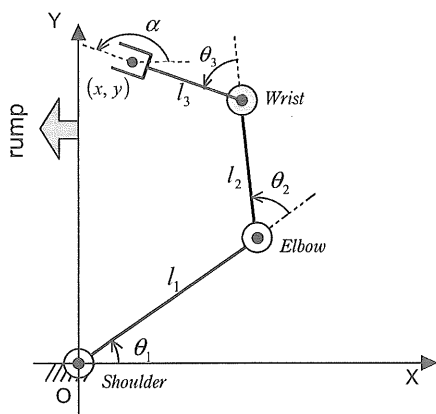


図3-9 ロボットマニピュレータの簡易モデル

節を有する多関節型マニピュレータでエンドエフェクタ位置をある目標値に合わせればよい場合には、腕全体としては無限に多くの状態を取ることができる。これは、一つの冗長自由度の存在によるものである。冗長自由度を有するマニピュレータ機構とした場合、関節やアクチュエータの数が多くなり、機構的に複雑となり、ロボット本体の質量も大きくなる。さらに、制御アルゴリズムが複雑になりそのための計算量が多くなる。これらの不利な点に見合うだけの利点を実現しなければ冗長性の意義は薄れる。

ここで、 $n$ 自由度マニピュレータについて、その第 $i$ 関節の関節変数を $\theta_i (i=1,2,\dots,n)$ 、腕全体の姿勢を表す関節ベクトルを $\theta=[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ とする。エンドエフェクタの位置および姿勢を表すエンドエフェクタ状態ベクトルを $r=[r_1, r_2, \dots, r_m]^T$  ( $m \leq n$ )とする。すなわち、前述した作業中のエンドエフェクタの位置と姿勢を記述するパラメータである作業座標を意味する。

3次元ユークリッド空間の中でエンドエフェクタが自由な位置姿勢をとり得る一般的な場合には $m=6$ となる。しかし、2次元平面内を動くマニピュレータでそのエンドエフェクタの平面内での位置のみを問題とする場合は $m=2$ であり、位置のみならず姿勢をも問題とする場合は $m=3$ として定式化できる。

$\theta$ と $r$ の関係はマニピュレータの機構によって定まり、一般に非線形となる。エンドエフェクタの位置と姿勢を表すベクトル $r$ は関節変数を表すベクトルより

$$r=f(\theta) \quad (3.9)$$

で与えられる幾何学的関係をもって計算される。

ロボットは、各関節角を制御することによりカップの装着作業を実現する。このとき、逆運動学・ヤコビ行列を解くことにより、作業座標系におけるエンドエフェクタ位置をマニピュレータの関節角度・関節速度に変換することが必要である。ヤコビ行列 $J(\theta)$ は、(3.9)式で表される関数を局所的に線形化した変換行列として定義される。

(3.9)式を時間変数で微分すると、

$$\dot{r}=J(\theta)\dot{\theta} \quad (3.10)$$

を得る。ただし、 $\dot{r}=dr/dt$ 、 $\dot{\theta}=d\theta/dt$ 、 $J(\theta)=df(\theta)/d\theta \in R^{m \times n}$  ( $m \times n$ 実行列の集合)である（吉川, 1992）。本研究で扱う3自由度回転関節のマニピュレータ機構に対して、

$r=[x,y,\alpha]^T$ とした場合のヤコビ行列 $J(\theta)$ を求める。(3.9)式は

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \alpha &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

と容易に求まる。(3.11)式より

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -(l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \dot{\theta}_1 \\ &\quad - [l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_2 - l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_3 \\ y &= (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \dot{\theta}_1 \\ &\quad + [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_2 + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_3 \\ \alpha &= \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{aligned} \quad (3.12)$$

ゆえに,

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} -(l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) & & & & & \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & -[l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)] & -l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & & \\ & & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & & \\ & & & & 1 & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

を得ることができる。

本システムでは、エンドエフェクタを装備した第3関節軸を牛体軸に沿って常に平行な姿勢をとることによって、後肢に衝突する危険性を最小限に回避しつつ、前述したように極めて狭隘な後肢間に進入して後乳頭に接近できる可能性を広げることをねらいとして、手先の回転軸の方向を不変 ( $\alpha = \pi$ ) とした。したがって、本マニピュレータはエンドエフェクタ中心位置のみを問題とすればよい2自由度機構と本質的に同じものと考えることができる。この第3関節軸の姿勢拘束条件のもとではマニピュレータには冗長性が無くなり、さらに特異姿勢(能力の退化する腕姿勢:吉川, 1992)でもないとする  $m=n$  となり, (3.13)式のヤコビ行列は正則となる。これを用いた試作マニピュレータの可操作度(特異姿勢からの近さを表す指標:日本ロボット学会, 1995)の評価については, 第5章(5-5)において検討する。

搾乳ロボットの第3関節軸姿勢制御は、一定の安全を確保しながら狭隘な作業空間でのマニピュレーションを可能とする。また、これに付随して本手法はカップ本体中心軸回りの回転角を与えないために、カップ端に直結するショートミルクチューブに捻りを伴わずにカップを装着できることが期待される。

### 3-4-3 作業域とリンク長の決定

提案した標準作業域をもとに、マニピュレータを構成する各アームのリンク長を決定する。前述のように、第3リンクを一定の姿勢に制御する場合には、その作業域は本質的に第1および第2関節の運動によって形成されることとなる。一方、長さ $a$ のアームを $60^\circ$ 振るとスパン $a$ が得られる。よって $a \times b$ の矩形作業域を得るには、アーム $a$ とアーム $b$ を直角に配置して各々を約 $60^\circ$ 振れば良い。しかし、実際にはこの時の作業域は扇形になるので、その中にの矩形を確保するには約 $70^\circ$ 振らなければならない。

図3-10は、本マニピュレータの任意姿勢作業域とこの領域に含まれる標準作業域の相対位置関係を示す。図に示すように、長さ $l_1$ と $l_2$ を有する2本のリンクを回転関節で接続するマニピュレータ機構によって、 $l_1 \times l_2$ の作業域を確保できる。第1と第2アームの運動によって作業域を形成する本機構は本質的にはスカラ型ロボットと同類であり、スカラ型を用いたMAKINO(1985)の評価によれば、Y軸方向におけるマニピュレータ台座中心と標準作業域との距離は「 $0.85 \times l_1$ 」と指定すれば理想的である。

さて、第1および第2アームのリンク長の和を「 $l_1 + l_2$ 」として、最大作業域の面積を最大にするには $l_1 = l_2$ とすれば良いので単純に $l_1 = 350\text{mm}$ ,  $l_2 = 350\text{mm}$ となる。実際にヒトの上肢構造について、肩部の横開き方向の自由度および手首の自由度を無視して2関節リンク機構とみなした場合、上腕と前腕の長さがほぼ同等で(人類学講座編集委員会, 1980)、最小の材料で最大のリーチを

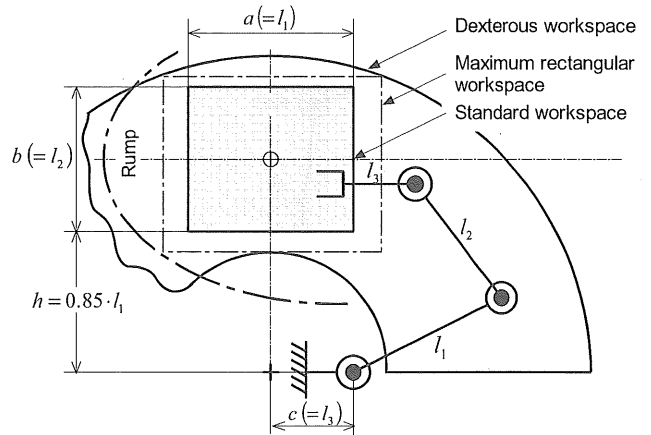


図3-10 牛体とロボット機械系の相対位置関係

得るようになっている。しかし、提案する本システムの場合、初期状態から標準作業域に侵入するまでのアームの展開動作過程あるいはその逆行程においても、障害物回避を優先させることを前提とすれば $l_1 > l_2$ とした方がよい。ここでは、 $l_1 = 400\text{mm}$ 、 $l_2 = 350\text{mm}$ を採用することで、標準作業域としてはXとY軸方向にそれぞれ400mmと350mmの領域が確保される。第3アームリンク長は、X座標において後乳頭（最小値：182mm、5%点：212mm）と動的障害物である後肢前面（最大値：390mm、95%点：360mm）との位置偏差に基づいて $l_3 = 200\text{mm}$ と設定した。こうした設定のもと、図3-7に示した狭隘な後肢間空間に対しても、後肢との干渉を回避しつつ、第3アームを進入させて後乳頭へのマニピュレーションが可能になると考えられる。

また、これら各リンク長の設定によってマニピュレータの台座位置を決定することができる。坐骨端を基準とするX座標においては、台座中心を標準作業域中心から+方向（頭部方向）に200mm（第3アームリンク長）ずらして580mmのポイントに指定すれば良い。さらに、Y座標においては前述の理由から牛体中心軸から「 $175 + 0.85 \cdot l_1$ 」（ $\approx 500\text{mm}$ ）が理想的な設定値ということになる。

以上の設定のもとでは、マニピュレータの各アームを折り畳んだ初期状態において第2関節軸のX座標は950mmとなり、図3-7に示した許容領域（上限値=1190mm）の中に十分収まる寸法となる。よって、少なくともアーム展開動作のために、前肢～後肢間における空間を強制的に確保する必要はなく、また機械系が四肢に衝突・干渉する危険性を十分回避できると考えられる。なお、ここで提示したマニピュレータの大きな特徴のひとつには、既存の搾乳ロボットのマニピュレータに比べて各リンク長を短くするとともに、より自由度を高めた多関節型機構としている点が挙げられる。すなわち、繋ぎ牛舎への適用を前提とする本システムでは、牛舎内での移動機能の付加は必須であり、限られたストール空間内に進入して円滑な動作を行うためには、可能な限り機械系のコンパクト化と軽量化を図る必要がある。こうした意味で、放し飼いや搾乳ロボットシステムの設計開発と根本的に発想や理念を異にするものであろう。

### 3-5 摘 要

繋ぎ飼いを前提とした搾乳ロボットの場合、その作業環境であるストールに起因する制限要因があるので、既存の産業用ロボットをそのまま適用してロボットシステムを構築することは、現場での使用条件や運動特性、コストを考慮すれば適切ではない。したがって新たに繋ぎ飼いや搾乳ロボットのためのマニピュレータ機構を構築する必要がある。本章ではロボットの機械系設計指標を得ることを目的として、牛の寸法の測定結果をもとに動的障害物である四肢等を回避して、ティートカップをマニピュレーションする上で安全な作業域をモデル的に示した。ここで得られた基本機構と設計指標は、牛と機械とが共存する空間において双方の安全性確保に資するものである。

本章では、ロボット機械系に要求される自由度とリンク長等の基本仕様を以下のように提案した。

- 1) ロボット機械系の基本機構は、位置決め用の回転2自由度（肩・肘関節）、牛体軸に常に平行なる姿勢を維持する姿勢決め用の回転1自由度（手首関節）とし、これに装着動作を行うために鉛直方向の1自由度を加えた平面多関節型機構で対応は十分であると判断した。
- 2) マニピュレータは、単独のティートカップを把持して個別の乳頭を探索する方式とした。また、牛体後躯を物理的に捕捉する機構にマニピュレータを含むカップ装着機構を装備することによって、牛と機械系との相対位置関係を確保する。作業座標系とロボットのリンク座標系を概ね同一の座標系とみなすことができ、これに基づいてロボットの運動学的解析が容易となる。
- 3) ロボットのX-Y平面内における標準作業域を350×350mmのサイズと提案して、これにマニピュレータの姿勢決め用の拘束条件を考慮すると、ロボット台座の位置座標は、坐骨端を基準としたX座標580mm、Y座標は牛体中心軸から約500mm離れた点が理想的である。また、ロボット台座側からマニピュレータ先端に向けて順に番号を付けた3つのアームリンク長は、標準作業域の設定に基づいて $l_1 = 400\text{mm}$ 、 $l_2 = 350\text{mm}$ および $l_3 = 200\text{mm}$ と設定した。これらの仕様設計により、牛体構造から求められる搾乳ロボット機械系のほぼ必要十分な条件を満たすものと判断した。

## 第4章 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

### 4-1 緒言

本システムにおいては、繋ぎ飼い固有の問題解決に向けた搾乳ロボットを一種の"作業移動型ロボット"として位置付けて、牛舎内およびストール内での移動機能とマニピュレーション機能を併せ持つことにより、適応性の高いティートカップの装着作業を実現する。牛舎内移動機能においては、第1章でも触れた繋ぎ飼い牛舎への適用を図った搾乳ユニット懸垂型搬送システムが一つの参考となる。すなわち、移動プラットフォームを舎内上方空間に配したレール上を走行する機構とした上で、これにロボット搾乳ユニットを搭載して腕作業を中心に動く牛に追従可能な機能を有するロボットを想定している。さらに、第3章においてストール内での牛の動きに伴う機械系の追従性を実現するための移動機能は物理的に牛体後躯を保持し、これに自動搾乳ユニットを連結することによって無制御でロボットの作業座標系とリンク座標系を概ね同一にするという概念を提示した。

マニピュレーション機能においては、第3章で牛体構造に基づいて特にマニピュレータ機構の自由度と台座の設定など搾乳ロボットとしての基本的な設計指針を述べた。ロボットは通常6自由度を必要とすると言われるが、これは空間的なハンドリングを想定するからである。その場合には位置決め自由度3、姿勢決め自由度3の合計6を必要とするのである。しかし、平面的なハンドリングでは位置決めの回転自由度2、姿勢決めの回転自由度1の計3自由度で十分であり、本研究の目的にあってはティートカップ装着動作のための並進自由度1（位置決め平面に直交する方向）を加えることとした。

搾乳ロボットの場合、これまでに述べたように導入の前提として飼養形態が放し飼いか繋ぎ飼いであるかの差異は極めて大きい。前者は、任意の搾乳ストールにおいてロボット作業が行われるのに対して、後者はロボットが個別のストールまで移動してから搾乳を行う必要がある。しかし、舎内上方空間に配した移動のための走路と当該ストールの位置認識を構築すれば、移動そのものは複雑かつ困難な作業環境ではないと考える。この点が他の農業用ロボットと異なり、走行性や走破性に優れている必然はないが、移動に耐えうる軽量化が要求される。

繋ぎ飼い用搾乳ロボットは、移動は牛舎内あるいはストール間においてはシーケンシャルな動作で比較的容易と考えられるが、牛に直接動作を働きかけるストール内においては牛側の要求・習性に逆らわずで機械動作を進めるべきではない。これは、BOTTEMA (1992) や野附 (2000) の提言なり、筆者らが第2、3章で述べた測定調査を通じて得た結論でもある。

牛へのティートカップ装着過程における作業は、上記の概念に基づいて「ストール内移動機能とマニピュレーション機能の有機的結合や統合をメカニズムあるいは制御の両面から図る」ことにより、移動機構単体やマニピュレータ単体と対比してより効率的なロボット動作を実現することに意義を見出すものである。以下、マニピュレータが最大能力を発揮するためのロボット機構全体の設計概念を検討する。

### 4-2 繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムの基本構想

表4-1に、これまでに開発された放し飼い用のロボットシステムと対比させて本システムの特徴を示す。これまで欧州主体で開発が進められた搾乳ロボットシステムの概念は、全て放し飼いへの適用を前提としており、よって家畜の搾乳ストールへの自発的訪問を誘引するための施設・機器のレイアウトや給餌方法を伴う行動学的戦略が要求される。これらに関わるこれまでの研究実績は枚挙に暇がない（例えばWINTERら、1992；DEVIRら、1993；HALACHMI、2000；柏村、2000；LENTERENら、2002）。

一方、繋ぎ飼い用のシステムでは、ロボット作業環境が各牛の日常的な生活空間であるストールとなるため、機械系の仕様や構造を決定する上で制約が大きい。特に、前項にて述べたように牛舎内での移動機能をも要求されるが、舎内通路上あるいはストール面という作業環境は糞尿等による腐食、走行の安定性といった問題を抱える。これへの対処として、移動プラットフォームの経路として舎内上方空間にレールを敷設して移動経路を設定し、これに沿ってロボット機械系を移動させる方策が有効と考えた。その上で繋ぎ飼い用のシステムとしては、不可欠なパイプラインとの断続と生活空間であるストール内での牛体を保持した上で、乳頭を検出してティートカップを装着することが求められる。ここで、ロボット機械



表4-1 繋ぎ飼い用と放し飼い用搾乳ロボットシステムの相違点

対比項目	繋ぎ飼い用	フリーストール用
ロボット作業環境と環境整備の難易	繋留ストール 困難：牛にとって居住空間	搾乳専用ストール 容易：牛にとって一過性の空間
移動機能	必要：カップのマニピュレーション機能との分担⇒要軽量化	不要：マニピュレータ台座の固定化
故障時の緊急対応	ストール内まで機械を移動した後、通常のマニュアル装着が可能	マニュアル装着するために、牛をロボットストールまで追い込む必要あり
搾乳方法	牛個体の産次、乳期等履歴に応じた搾乳スケジュールの計画が可能	ロボット作業能率が牛の自発的行動に依存するため、牛群の社会的序列に左右される場合あり
牛の行動制御	起立誘導が必要	カウトラフィック：休息・搾乳・採食各エリアおよび通路等牛舎内のレイアウト設計の適正化が必要
放牧体系への対応	困難	可能

系の設計に際して、牛側から求められる考慮すべき事項は以下のである。

- 1) 自動装着過程において、機械的な強制力をもって牛を保持すべきではない。強制的な保持は極めて危険かつ非効率的な方法であり、結果として徒労に終わる。牛の自由な動きを抑制することなく、カップ装着作業を実行すべきである。
- 2) 牛体および乳頭は常に動いており、特に乳頭先端部は牛体の動きと連動するのみでなく、呼吸運動に同期した微小な振動が観察される。よって、乳頭への追従を図りながらカップ装着を実時間で実行すべきである。
- 3) 搾乳中においても、牛体は大きく動いた際にティートカップが離脱することがある。市販搾乳ロボットにみられるようなボックスタイプであれば動きの範囲を規制できるものの、本研究では可能な限り装着した搾乳ユニットが牛体の動きに連動して追従する機能を必要とする。
- 4) "狭義の搾乳"を考えた場合、現在のミルクの吸引機構は1世紀に亘って使用されてきた実績を有しており、ロボットシステム独自に基本的にカップ構造および吸乳機構を大きく変更しないことを前提とする。

一般的な市販の据置型ロボットマニピュレータにおいては、先端の位置精度を確保するために、各関節の剛性を上げる努力が成される。そのため、人の腕と同サイズの市販マニピュレータは、サイズが小さいにも拘わらず非常に重い。しかし、ティートカップ装着作業においては数mm程度の誤差は許容範囲と考えられる。したがっ

て、機械システム全体の安定性、作業空間の制約の克服、牛体追従性や制御応答性の確保のために、本システムではマニピュレータを極力小型・軽量化することに力点を置いた。

本研究では、ロボット動作対象となる乳頭の配置や後肢等障害物からの回避を考慮し、想定したタスクを遂行する必要最小限の機能を搭載するマニピュレータを試作した。ここで、対尻式の繋ぎ飼い牛舎をベースとした構想を図4-1に示す。搾乳ロボット機械系は、搬送用台車に懸架されて主レール軌道上を移動し、順次計画された搾乳対象個体のストール後方から分岐レールに進入し、ティートカップのマニピュレーションを実行する。繋ぎ飼い用搾乳ロボットの移動経路設計は牛个体ごとの泌乳期や泌乳量等の履歴に基づき、機械的に搾乳作業を計画できる点で放し飼い方式とは大きく異なる。ロボット機械系は、牛体位置検出追従機構、ミルクタップとの自動着脱機構、ティートカップ自動装着機構から構成される。これらは、搬送用台車に懸架されてストール間を移動し、分岐レール進入後は牛体位置検出追従機構によって牛体後駆を保持する。

### 4-3 ロボット機械系の構成

#### 4-3-1 牛体位置検出追従機構

図4-2に牛体位置検出追従機構（以下、牛体位置追従機構と称す、図中GPU=Global Positioning Unit）を懸架する台車の概要を、図4-3にはロボット機械系の外観を示す。パイプライン搾乳を想定して、台車はストー

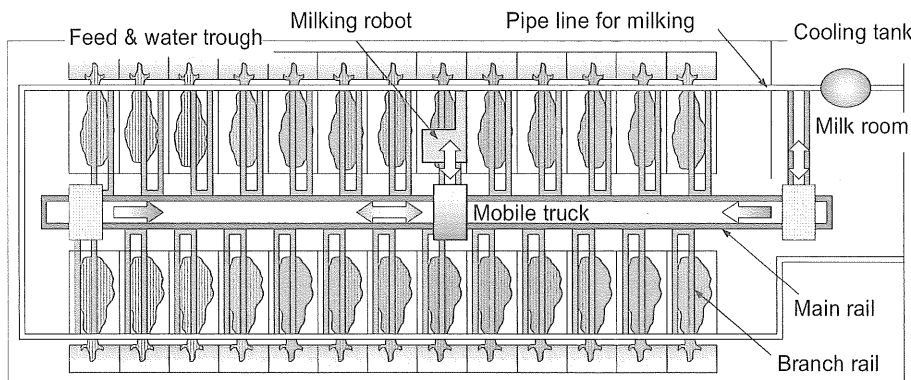


図4-1 対戻式繋ぎ飼い牛舎に適用する搾乳ロボットの概念

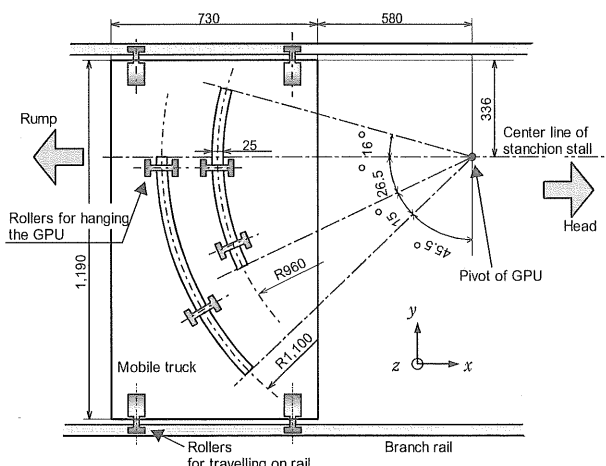
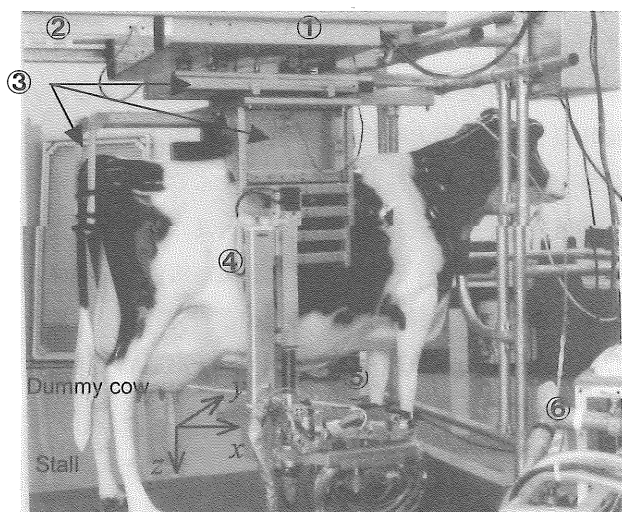


図4-2 牛体位置検出追従機構を懸架するレール走行式台車



- ① : Mobile truck
- ② : Rail
- ③ : Global positioning unit(GPU)/ramp pad + hip bone plate
- ④ : Ball-screw mechanism
- ⑤ : Milking robot system/robot manipulator + magazine arm with teatcup holder
- ⑥ : Milking unit+robot controller

図4-3 試作した搾乳ロボット機械系

ルに進入し、台車側のディストリビュータがパイプラインのミルクタップに向けて直進し、真空および牛乳配管が接続される。また、牛体位置追従機構は牛体において外部からの接触圧力によっても変形量が最も小さな部位と思われる、左右の坐骨端と腰角部の4点を保持する。

台車に懸架された本機構は、腰角左板を水平に開放したまま、ストール後方から上方空間のレールに沿って進入して係留牛の坐骨端に接触するまで接近する。同時に左腰角に接触するまで徐々に腰角左板を降ろしながら、左右の腰角を挟み込む。台車および牛体位置追従機構の各部は、表4-2に示すDCモータ駆動により動作する。当面の実験においては、これら一連の動作はリモートコントローラを介してDCモータを駆動した。また、ミルクタップとの自動着脱は模擬的な動作の確認に留め、実際の搾乳試験ではバケットミルクを用いた。

一般的な繋ぎ飼いストールにおいては、牛はスタンションによって繋留されることから、牛は体軸上の頸部を支点として左右に体を移動させると、後躯の任意の点は扇状に運動すると仮定できる。よって、腰角部および坐骨端を保持する本機構は、固定された台車に懸垂された状態で、扇状に動作させることによって牛体の動きに追従することができる。台車底面に支点からR960とR1100の2本の円弧を描く幅25mmの溝を設け、台車底面上の溝を跨ぐキャストによって牛体位置追従機構を懸垂する構造とし、牛体の動きにともなって頸部を支点として扇状にスライドする機能を持たせた。また、同時に前後200mm程度の動きを許容できるスライド機構も有する。この機構による牛体保持・追従によって、後述の自動搾乳ユニットはXY平面内において自在に支持さ

表4-2 牛体位置検出追従機構；GPUの動力系緒元

動作	アクチュエータ	出力
ディストリビュータ接続	DC減速モータ	12V-7.2W
台車前後進	同上	12V-35W
追従機構扇状駆動	同上	12V-13W
左腰角板開閉	同上	12V-7.2W

れ、後述のマニピュレーションのベースが牛体上に固定されることとなる。すなわち、ロボットの運動学解析のために設定される座標系は、ロボットのベース座標系（またはリンク座標系）と作業座標系、すなわち作業対象物である牛体、乳頭）をほぼ同一の座標系と位置づけることができる。ここで、図4-2や図4-3に示すように、ロボット機械系が動作する座標系をXYZとし、X軸を牛体の軸方向とする。

牛体位置追従機構の設計に当たっては、ストール内空間の大きさとともに牛のストール体長、坐骨端から腰角までの水平距離（尻長）、腰角幅および体高を指標とした。第3章での調査結果から、坐骨端と腰角部を保持するための機構寸法とスライド量を決定することができる。機構設計上の条件は、坐骨端から腰角部中心までの水平距離を425～550mm、左右から挟み込む腰角幅は500～640mm、機械系がストール内に進入するための空間を体高の最大値1550mm以上確保する必要があるとした。

#### 4-3-2 ティートカップ自動装着機構

##### 1) ティートカップ保持機構

ティートカップ自動装着機構は牛体位置追従機構に機械的に接合されており、これによって牛体と機械系の作業座標系は同一となる。装着機構の座標原点と牛体とのX-Y平面内での相対的位置関係を確定し、牛体が急激にあるいは大きく動いても追従し、両者の位置関係を概ね維持する機能を有している（HIRATAら、1998；平田、1999；平田ら、1999；HACHIYAら、2002）。この相対的位置関係の維持機能は、効率的なティートカップ装着時の必要条件のみならず、装着後においてもティートカップ脱落を回避する。

ティートカップ自動装着機構とは、図4-4～図4-6に示すように4本のティートカップを収納する保持機構（以下、マガジンアーム）と、ロボットマニピュレータ

（以下、マニピュレータ）から構成される。マガジンアームの台座は、マニピュレータの台座と同一の垂直軸（以下、昇降機）下部に固定して、全体を上下させる機構とした。よって、マガジンアームとマニピュレータとのZ軸上の位置関係は常に一定である。また、マガジンアームとマニピュレータの台座はX軸上では坐骨端からそれぞれ550mmと615mmに位置する。これら台座位置の設定は、前章で述べた牛の後肢踏み換えの危険を可能な限り回避しうる空間の大きさ、マニピュレータのリンク長およびその作業領域を基に設定した。昇降機とマガジンアーム回転軸の動力には、各々100W（安川電機製 SGMP-01B314B）と50W（松下電器製 MSM-5A、減速比：80）のACサーボモータを採用した。

昇降機はボールネジ駆動とし、マガジンアームは初期位置～乳房下方までの展開過程において、カップ保持関節軸が牛体軸に対して常に平行な姿勢となるよう、チェーン・sprocketを介してティートカップ保持関節軸とマガジンアーム回転軸とを連結し、両軸の回転角度を一致させる平行リンク機構を構成した。マガジンアームの構造部材にはアルミニウムを用いており、リンク長は503mm（回転駆動軸～カップ保持関節軸）、幅は63mm、質量は約5kgである。本機構は搾乳中終始乳房下方で展開していることとなる。よって、後肢の踏換えや干渉を極力回避するために、台座からホルダ支持旋回部にかけて一体型アームを外側に迂回させる構造とした。マガジンアームの末端には各分房用ティートカップのホルダを装備し、空気圧シリンダ（SMC製：前房用＝CDQ2BH32F-35D、後房用＝CDQ2BH32F-22D）により平行リンクを介して、前後双方のホルダを154mmのストロークで上昇・下降させることができる（図4-5）。

シリンダの駆動回路はメータアウト方式とし、上昇・下降速度はスピードコントローラで調整した。シリンダ作動時の給排気衝撃音により、牛が驚愕あるいは忌避行動を示さないよう、各電磁バルブには消音器を取り付け

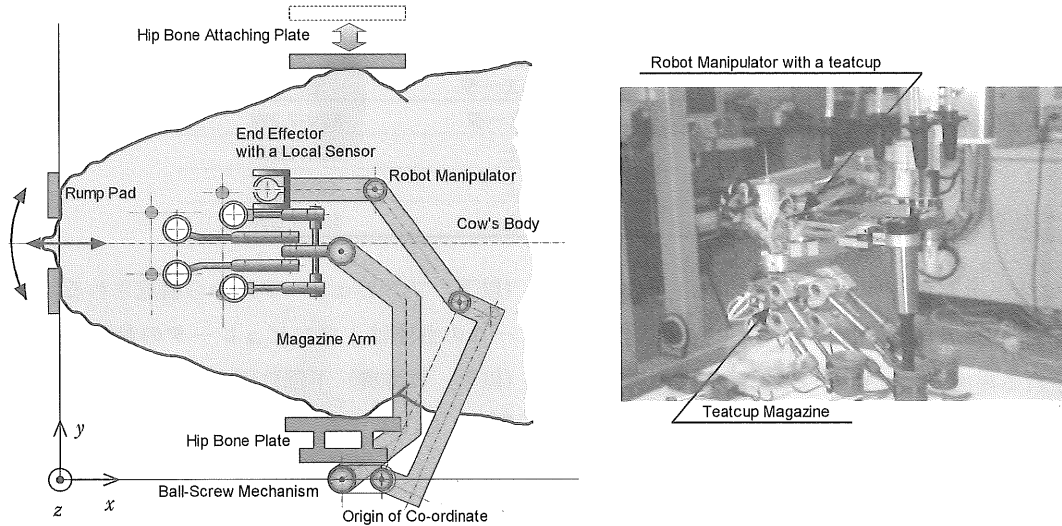


図4-4 ティートカップ自動装置機構の平面的位置関係と外観

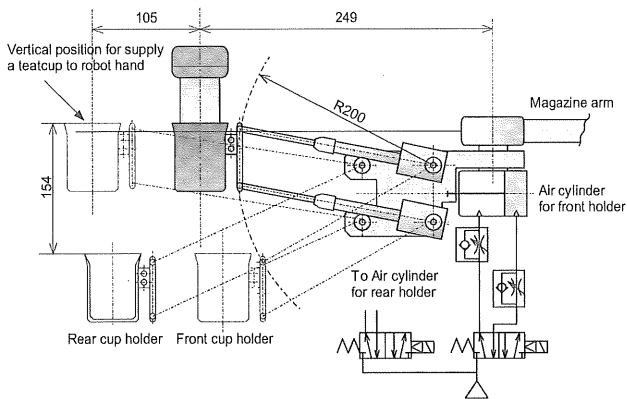


図4-5 マガジンアームのティートカップ保持機構

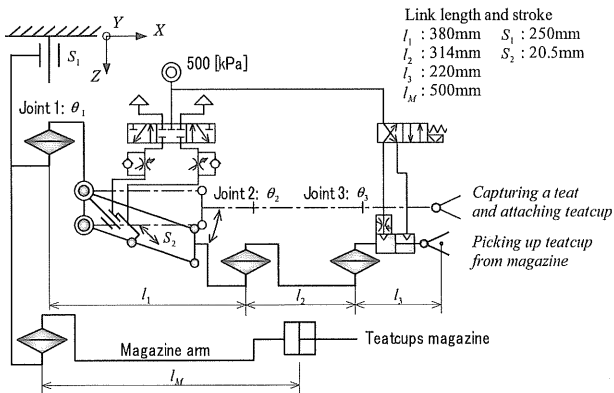


図4-6 ロボットマニピュレータ

て音の発生を抑制した。カップホルダ間の平面的な相対位置の設定においては、搾乳牛の平均的な乳頭間距離に基づき、前房・後房および前後間では各々140mm、80mmおよび105mmの間隔とした。なお、既市販ロボ

ットシステムのティートカップの配置においては、PROLION製では各々170mm、80mmおよび140mm、LELY製では125mm、70mmおよび75mmの設定となっている。ロボットのエンドエフェクタが、ホルダからステンレス製のカップを取り出しやすいよう、またカップの位置ずれが生じないようにカップホルダの部材にはキャストナイロンを用い、ホルダ内径はカップシェル外径より1.5mm大きく製作した。

各ティートカップに接続されているショートミルクチューブは、各ホルダ底部を通してマガジンアーム下部に沿って固定し、さらに各々電磁バルブを介して、ミルククローに直結させ、集乳させることとした。また、各チューブの管路途中には半導体式圧力センサ（オムロン製：E8CB-CN02CB, 0~100kPa）を取り付け、カップ内の圧力応答をAD変換して自動装着成否の判定指標とした（6-3-2参照）。

マガジンアームおよびマニピュレータを支持する昇降軸の動作においては、リミットスイッチを設けて原点復帰およびオーバーラン防止を図った。

## 2) ロボットマニピュレータ

前章で述べたように、マニピュレータの仕様決定に際しては、四肢の配置や乳頭端の地上高および腹部の高さ等の位置関係から、水平方向に運動能力の優れた機構が向いていると考えた。ティートカップのマニピュレーションに要求される自由度では、位置決めは2、姿勢決め

には1, 合計三つの旋回関節による水平多関節型とし、これに装着動作を行うための直動自由度1 (S<sub>1</sub>, 前述昇降軸)を加えた構成で対応は可能である。さらに、マガジンアームのホルダからカップを引き出すための動作を実行する自由度 (S<sub>2</sub>)を設けた。

X-Y平面内における3自由度機構は冗長であり、無限の動作パターンが存在するが、ここでは第3関節を牛体軸に対して常に平行な姿勢を維持する拘束条件を適用した。すなわち、エンドエフェクタが狭隘な作業空間である後肢内側空間に進入して後乳頭へ接近する場面においては、上記の姿勢維持は後肢への干渉を回避する有効な方法であると判断している。

図4-6に示すように、試作したマニピュレータは多関節型5自由度機構であり、その総リンク長は873mmである。収納時のマニピュレータは第1リンク横に第2リンクを、第2リンクの真上に第3リンクを重ねることによって、収納時の全幅は110mm、長さ442mmとコンパクトな設計とした。

X-Y平面内に限定すれば、配置した関節は肩、肘および手首と人間の腕同様の自由度を有するが、各リンク長は人間の腕よりも若干長めの寸法となっており、全質量はマガジンアームと同様に約5kgである。各関節はハーモニックドライブ減速機付ACサーボモータで駆動されるものとした。各モータの配置は肩関節と肘関節用のモータを台座近傍に、手首関節には肘関節近傍に配置して手先部の軽量化を図った。

ロボットの基本機構は、主としてその運動学的性質(5-5参照)に関連しているのに対し、内部機構は主としてロボットの力学的性質に関連している。なお、試作

に当たってモータパワーを指標としてロボットの評価を行ったが、評価対象は設計の際の拘束条件にも評価関数にもなり得る(高野, 1986)。ここでは、各関節の駆動源として用いたモータを表4-3に示す条件設定のもとで選定してその適性を検証した。

エアグリッパ (M<sub>G</sub>=0.5kg) と1本のティートカップ本体 (M<sub>C</sub>=0.8kg)を加算したマニピュレータの全質量

$$\left( = \sum_{i=1}^3 (M_{M_i} + M_{B_i} + M_{A_i}) + M_G + M_C \right) \text{は、約6kgとなる。}$$

各アームのリンク長*l* (図4-6参照)と質量M<sub>Ai</sub>から各関節のZ軸回りの慣性モーメントI<sub>Zi</sub> (i=1,2,3)はそれぞれ

$$I_{Z1} = \int_0^l \frac{M_{A1}}{l_1} \cdot x^2 dx + \int_l^{l+l_2} \frac{M_{A2}}{l_2} \cdot x^2 dx + \int_{l+l_2}^{l+l_2+l_3} \frac{M_{A3}}{l_3} \cdot x^2 dx \quad (4.1)$$

$$I_{Z2} = \int_0^{l_2} \frac{M_{A2}}{l_2} \cdot x^2 dx + \int_{l_2}^{l_2+l_3} \frac{M_{A3}}{l_3} \cdot x^2 dx \quad (4.2)$$

$$I_{Z3} = \int_0^{l_3} \frac{M_{A3}}{l_3} \cdot x^2 dx \quad (4.3)$$

で求められ、I<sub>Z1</sub>=3.346、I<sub>Z2</sub>=0.969、I<sub>Z3</sub>=0.088×10<sup>4</sup>kgm<sup>2</sup>を得る。

次に、カップ把持後の各アームの運動区間と所要時間について第一関節軸は180°と2.5s、第2関節軸は90°と1.5s、および第3関節軸は180°と2.0sとし、加速区間θ<sub>Ai</sub>と加速時間t<sub>Ai</sub>をそれぞれ45°と0.5sと設定する。

これより、関節軸の角速度ω<sub>Mi</sub>(=θ<sub>Ai</sub>/t<sub>Ai</sub>・π/180)と角加速度ω'<sub>Mi</sub>(=ω<sub>Mi</sub>/t<sub>Ai</sub>)はそれぞれ1.571rad/sと3.142rad/s<sup>2</sup>であり、軸に拘らず同様である。よって、各軸の必要加速トルクτ<sub>Ai</sub>(=I<sub>Zi</sub>・ω'<sub>Mi</sub>)はτ<sub>A1</sub>=10.512、τ<sub>A2</sub>=3.043、τ<sub>A3</sub>=0.275Nmとなる。また、種々のケーブルやミルクチューブを引張る力をF(=9.8×2)[Nm]と仮定すると、各軸のトルクτ<sub>Ci</sub>(=F・∑<sub>i=1</sub><sup>n</sup>l<sub>i</sub>)は、τ<sub>C1</sub>=17.9、τ<sub>C2</sub>=10.5およびτ<sub>C3</sub>=4.9Nmと求ま

表4-3 マニピュレータ各関節の諸元設計条件

Joint	Power : P <sub>M</sub> [W]	Rated Torque : τ <sub>Ri</sub> [Nm]	Speed : S <sub>i</sub> [rpm]	Mass* : M <sub>Mi</sub> [kg]	Moment : I <sub>Ri</sub> [×10 <sup>4</sup> J]	Encoder : R <sub>Ri</sub> [P/rev.]
Joint 1	50	0.16	3,000	0.31	0.032	2,500
Joint 2	50	0.16	3,000	0.31	0.032	2,500
Joint 3	30	0.095	3,000	0.24	0.018	2,500

Joint	Reduction rate : R <sub>ri</sub> [-]	Efficiency : η <sub>i</sub> [-]	Mass** : M <sub>Ri</sub> [kg]	Mass*** : M <sub>Bi</sub> [kg]	Mass**** : M <sub>Ai</sub> [kg]
Joint 1	80	0.85	0.5	0.3	0.6
Joint 2	50	0.85	0.5	0.3	0.6
Joint 3	50	0.85	0.4	0.3	0.3

\*: Motor, \*\*: Reduction gear, \*\*\*: Bracket, \*\*\*\*: Arm

作に要する必要トルク $\tau_{ri}(=\tau_{Ai}+\tau_{Ci})$ は $\tau_{r1}=28.4$ ,  $\tau_{r2}=13.5$ ,  $\tau_{r3}=5.2\text{Nm}$ を得る。さらに、各モータの減速比を $R_i(i=1,2,3)$ とすると、各モータ軸の最大トルク $\tau_{MAXi}$ は、

$$\tau_{MAXi}=\eta_i \cdot \frac{\tau_{Ci}}{R_i} + \frac{I_{Zi}}{R_i^2} + I_{Ri} + \omega'_{Mi} \cdot R_i \quad (4.4)$$

により求められる。この結果、 $\tau_{MAX1}=0.372$ ,  $\tau_{MAX2}=0.295$ ,  $\tau_{MAX3}=0.239\text{Nm}$ となることから、モータの定格トルクとの差分 $\Delta\tau_i(=2.0 \cdot \tau_{ri} - \tau_{MAXi})$ は、 $\Delta\tau_1=-0.052$ ,  $\Delta\tau_2=0.025$ および $\Delta\tau_3=0.049\text{Nm}$ を得た。よって、第1関節のモータトルクが必要とするトルクよりも不足気味ではあるものの、ほぼ適正な仕様であると判断し、モータを選定した。

ロボットが他の機械と大きく異なるのは、自分自身の姿勢が変わることである。このために、各関節には複雑な荷重が加わる。また、関節は1回転以上回転することはなく、出力軸受には偏荷重がかかり、軸受にとっては好ましい使用環境とは言えない。さらに、リンクがシリアルに連鎖された片持ち構造となっていることから、機械要素の小型・軽量化が要求される。なお、本機構では重力方向の荷重は全て軸受で支持しているため、アクチュエータは垂直多関節型に比較して小さくできる利点を有することから、高速化が期待できる。肘と手首の回転関節は、歯付ベルトを介して動力を伝達する。図4-4に示したように、マニピュレータとカップ保持アームの昇降軸を牛体位置検出追従機構の右腰角板側面に取り付けたことから、マニピュレータは牛体右側方から展開させることとなる。

繋ぎ飼い牛舎への適用を前提とした本システムのように、牛舎内あるいはストール間での移動機能をも有する作業移動型ロボットは、搭載負荷による静的・動的安定性への影響を受けやすい。また、搾乳ロボットは、動的

障害物を回避しながら円滑かつ迅速なカップ装着動作を実行し得る動特性を持たなければならない。そうした観点から、本システムではマニピュレータのコンパクト化と軽量化を達成した。

### 3) エンドエフェクタ機構

エンドエフェクタは、次項の乳頭位置センサとティートカップを把持するエアグリッパから構成される(図4-7)。ティートカップ装着動作過程で、エンドエフェクタを上昇させる際に乳頭位置センサの上面が乳房面を押し上げることが想定されることから、板バネによるコンプライアンス機構で乳頭位置センサを支持することとした。センサ支持部は、その剛性の選定によって乳房への押付け抵抗を軽減し、また振動抑制も達成される。試作の結果から判断すると、マニピュレータ動作に伴う板バネの残留振動は目視で確認されたが、整定時間は短く、乳頭位置検出過程において作業上特に支障はないものと考えられた。

エンドエフェクタは、把持機構のツメ形状をティートカップシェル(φ44mm)に対応させて、これを電磁弁(2位置5ポート弁)を介して空気圧駆動の支点開閉型複動エアグリッパ(SMC製:MHC2-10D, 重量:39g)の開閉制御を行う。ツメの開閉は左右対称で角度は $30 \sim -10^\circ$ (閉時のツメ内径:47mm)と設定されており、指支点からワーク中心(ツメ支点)までの長さを82mm、ツメの幅を28mmとした。

エンドエフェクタは、ティートカップを把持した時点で概ねカップのセンタリングができる。試作したグリッパは、カップシェル面に対する直接的な把持力あるいは摩擦力を与えずに、+3mmの余裕をもたせて閉じたツメでシェル面を包囲するようにしてマウスピース直下を

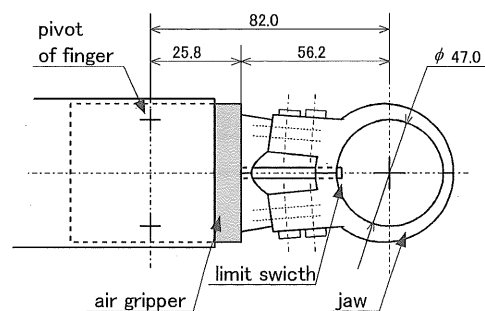
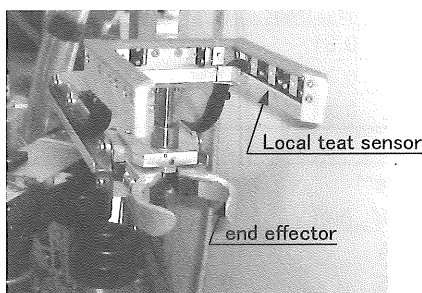


図4-7 ローカルセンサを装備したエンドエフェクタ機構

支持する方式とした。すなわち幾分傾斜した乳頭であっても、カップ内への真空圧適用によって乳頭端がティートカップ内に吸引されるとともに、カップが自ずとグリッパのツメから浮上して乳頭に装着される。この動作の成否は乳頭端とマウスピース面とのZ軸上の相対距離に依存するが、X-Y平面内での位置関係に誤差を生じている場合を想定して、この位置誤差を吸収するためのコンプライアンス機能を持っている。こうした理由から、エアグリッパの機種選定においては、把持力や質量、および摩擦係数等の条件設定を考慮せずに、機構の軽量化とコスト面を優先して選択したが、結果的には実用であった。

供試したティートカップ本体は、搾乳終了の時点で強制的にカップを離脱させるために、カテーテル（φ2.0mm）1本をシェル面に沿ってマウスピース内側に挿入し、ライナーを通過してその吐出口を内側に向け（図4-8）、電磁弁を介してカップ内へ0.5Mpaの圧縮空気を送り込むように改良した。

カップ自動離脱は、カップ内への真空解除と併せて本機能を付加することによって、カップは強制的に乳頭から離脱し、その下方で待機するマガジンアームの各ホルダ内に自然落下して収納される。ただし、ティートカップがホルダからスムーズに引き出され、また反対にカップがホルダに収納されるにはショートミルクチューブの長さの調整が重要であった。この調整が不十分であるとチューブとカップホルダあるいはチューブ同士の摩擦などによりうまくカップを取り扱えなかった。

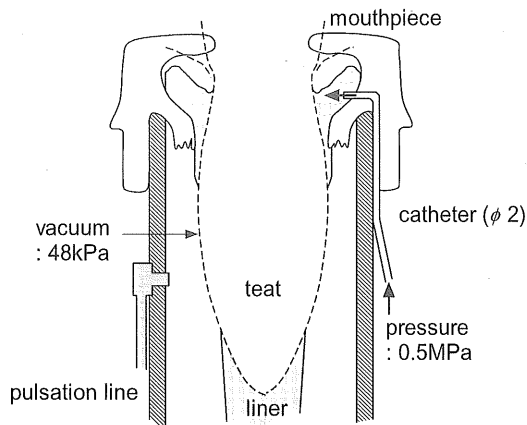


図4-8 ティートカップ自動離脱

#### 4) 局所的乳頭位置センサ

ロボット機械系は牛体位置追従機構によって牛の大きな動きに追従するが、呼吸等に伴う乳頭の微小な振動に対しては、マニピュレータは乳頭位置センサで示された目標軌道に追従して移動する必要がある。ロボットはエンドエフェクタの精密な位置決めを実現するため、乳頭位置センサによる相対位置検出を行い、その位置制御偏差を補正する。

試作した局所的乳頭位置センサ（以下、ローカルセンサと称す）は図4-9に示すように、66×80mmの内寸法のU字型アルミフレーム内側に10組の透過型狭視野光電素子（Keyence製PS-52、検出距離：300mm）を組み込み、10本の幾何学的な光路を構成した（後出図5-1）。また、発光素子と受光素子を交互に配列して光相互干渉を回避した。

センサフレームの寸法および配列の決定に際しては、狭隘な後肢内側空間への進入動作を想定したロボットマニピュレータの動作計画、乳頭の直径や乳頭の振幅特性（KLOMPら、1990；SCHILLINGMANNら、1993；八谷ら、1996）などに基づいた。なお、これまでの調査結果（3-3-2参照）からすると、前乳頭と後乳頭の直径はそれぞれ $25.2 \pm 3.7\text{mm}$ と $25.6 \pm 3.4\text{mm}$ である。乳頭がセンサフレーム内の光路を遮断すると、センサはその直下に配置したティートカップ中心との位置ずれを検出し、その偏差を減少させるようにロボット位置を補正する。

KLOMPら（1990）や筆者らの基礎実験によれば、ロボットはセンサ領域の目標位置（後出図5-1ではX座標34mm、Y座標0mm）に対して最大±5mmの位置

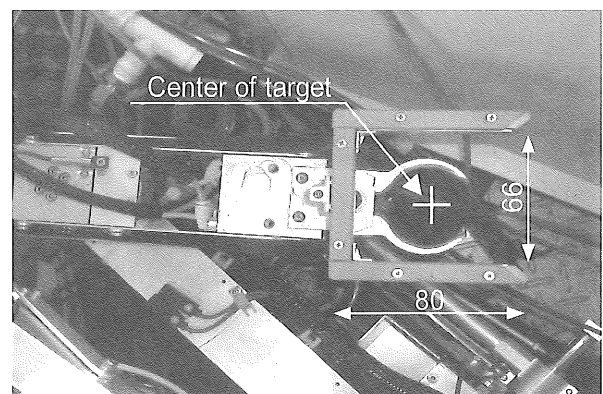


図4-9 エンドエフェクタ上に装備したローカルセンサ

誤差を許容できることが分かっており、ティートカップ内への真空の空気流と併せた装着手法においてはほぼ満足する条件である。装着手法のアルゴリズムについては第6章で述べる。また、センサ状態読み込み時間は、1計測当たり約10 $\mu$ sと実時間計測の可能性が高い。ただし、実システムへの導入に当たっては、この他に座標計算および座標転送時間等が当然付加されるが、コスト面やメンテナンスの容易性にも配慮し、乳頭位置センサとして実用的であると判断した。

4-4 制御システムとタスク

4-4-1 制御システムの構成

制御システムのハードウェア構成を図4-10と図4-11に示す。特に、図4-11に示すように、第2階層は位置制御型サーボドライバ（松下電機製：MSD5A $\times$ 1台+MSD3A $\times$ 2台、安川電機製：SGDA-01BP）と電源を内蔵した制御盤である。

第3階層以上がIBM-PC/AT互換機（Gateway2000P5, CPU: Pentium-166MHz, 32Mbyte）をホスト（以下、PC）とするPCコントローラで構成されている階層であり、モーションコントローラ（ハイパーテック製：HP-MCAT4, ボード当り4軸同時補間制御）2枚、PIO（ハイパーテック製：HPC-DIO64）2枚、エンコーダパルスカウンタ（同：HPC-CTR204F）およびAD変換器（同：AD12N16W-57）の各I/Oカードから構成される。第3階層は運動制御コントローラであり、逆運動学や軌道の補間計算を行い、第2階層への指令を生成する

階層である。第3階層はロボットシステムの心臓部に当たり、上記ボードは拡張スロットに挿入できるようISAバス仕様とした。各関節の位置サーボ系、逆運動学計算および目標軌道生成等、すべてPC上にMS-DOS Ver.6.2上でC言語を用いて記述した。サンプリングタイムは20msである。サンプリングタイムの決定方法は次章にて述べる。

ロボットシステムは、内部に設けた乳頭位置データのルックアップテーブルを参照して動作を開始し、ローカルセンサからの16ビットon-off信号をPCに取り込む乳頭追従制御系を構築している。本システムでは、マニピュレータ各関節を位置（角度）制御し、目標値と現在値の乳頭位置偏差に基づくパルス払い出し指令をサーボドライバに送り、各軸を指定位置に移動させる。なお、本

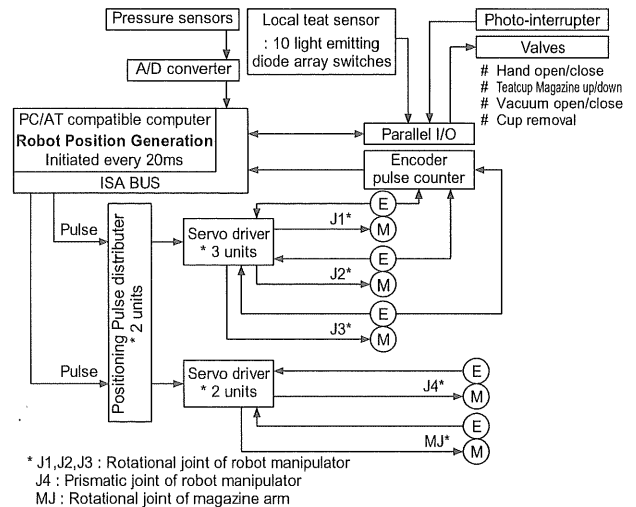


図4-10 ロボット制御ハードウェアの構成

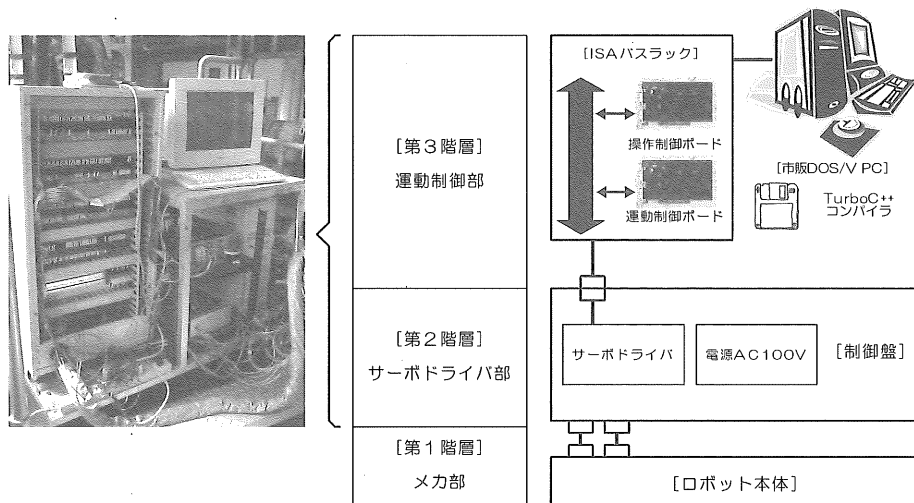


図4-11 PCコントローラを基軸とした制御ハードウェアの外観



システムで用いたモーションコントローラのハードウェア仕様ではエンコーダパルスカウンタ機能を有していないため、パルスカウンタを実装した。

#### 4-4-2 基本制御アルゴリズム

図4-12にロボット制御ソフトウェアの全体の流れを示す。当面の実験においては、牛体位置追従機構による牛の後軀の保持およびディストリビュータのパイプラインへの接続作業は、作業者が目視で確認しながらリモートコントローラを操作して行うこととした。この作業が完了した段階で、牛体の位置決めが確定しロボット作業座標系が決定する。この後のロボット動作は図のフローチャートにしたがう。ここで本フローチャートに出てくる各姿勢の説明をする。

初期姿勢とは、マガジンアーム、昇降機およびマニピュレータが原点にある姿勢であり、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, S_1, S_2$  および $\theta_w$ すべての関節変位が0であることを指す(図4-6参照)。ここで、 $S_1$ は昇降軸のストローク(=250mm)であり、 $S_2$ はマニピュレータ肩部に装備した上下動作空気圧シリンダのストローク(=20.5mm, 鉛直上の高低差=105mm)である。特に、 $S_2=0$ はマニピュレータがマガジンからカップを引き出す前のシリンダロッドを縮めた状態であり、装着動作時にはロッドが伸びた状態でマニピュレーションを実行する。図4-2において臀部側からみて左回転を+、右回転を-とした。

基本姿勢では、マガジンアームが牛個体ごとに定められた任意の角度で乳房下方まで展開した後に、マニピュレータの展開動作が開始する。基本姿勢は、第1関節( $\theta_1$ )と第2関節( $\theta_2$ )が同時に各々+方向に45°と-方向に90°旋回した後に、第3関節( $\theta_3$ )が-135°まで旋回して一時停止した姿勢を意味する。マニピュレ-

ータ台座は前肢~後肢間の空間に配置しているため、展開動作過程では牛とロボット機械系双方の安全性を確保する意味で、互いに干渉・接触しないことが最低条件である。また、マニピュレータの動作時間の短縮のために、部分的に関節の移動範囲が大きくなるように各関節によって動作を分担することとした(図4-13)。

初期設定ではインターフェイスの初期化、パルスカウンタ等のクリアを行い、初期姿勢の状態で当該牛個体の

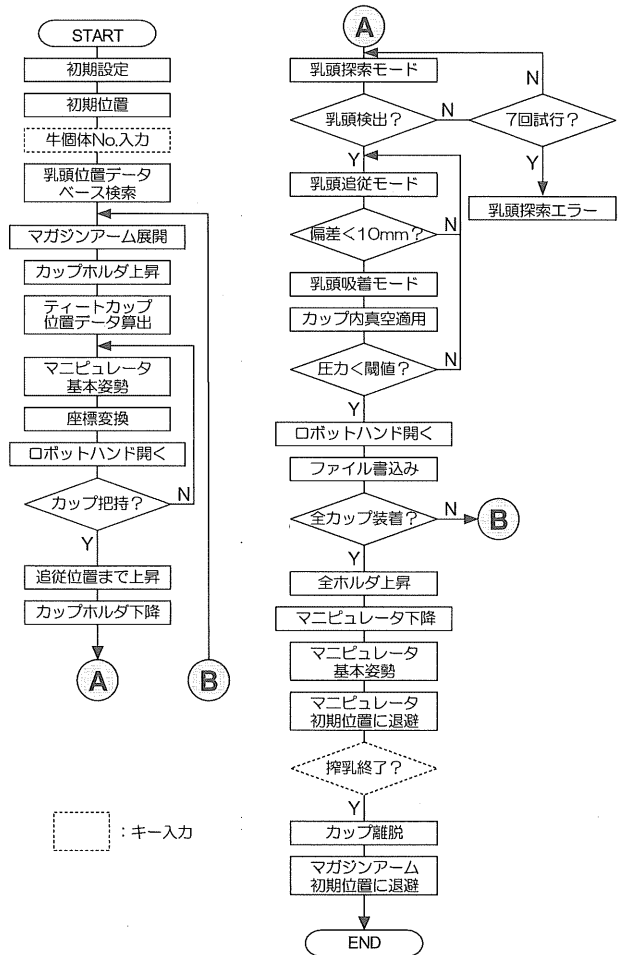


図4-12 カップ装着動作のメインフローチャート

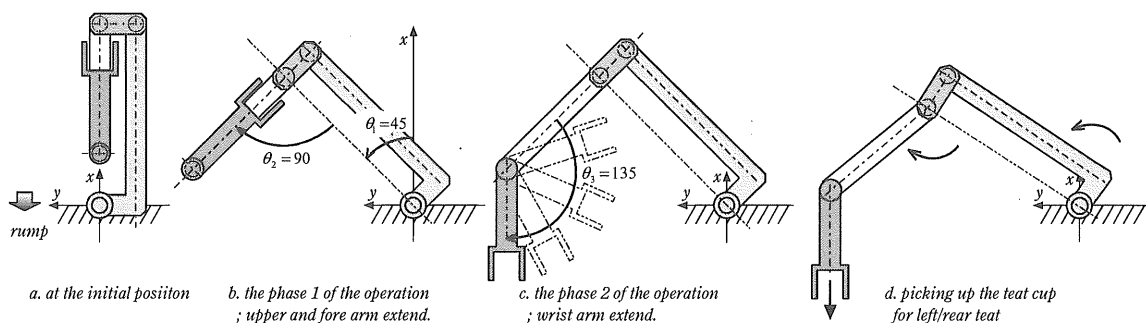


図4-13 初期位置からカップ把持までのマニピュレータ展開動作

教示乳頭位置データファイルの読み込みを行う。本研究で開発したシステムにおいては、牛個体の自動認識機能を有していないため、初期設定の際に牛個体No.を入力する必要がある。

マガジンアームは $\theta_M=45^\circ$ まで展開した時点で前後のホルダを一旦上昇させて、そのまま当該牛個体の前乳頭座標に合致する指定位置まで展開すると、前乳頭用カップホルダのみを下降させる。ここでロボットマニピュレータが動作を開始する。マニピュレータは基本姿勢まで移動してから、既に待機している後乳頭用カップホルダ位置まで進行して当該カップを把握する。各乳頭へのカップ装着順序は当面、左後→右後→左前→右前と固定してマニピュレータ台座から離れた乳頭から順に以下を実行する。装着順序の決定理由は、主に二つある。まずは、エンドエフェクタの乳頭への接近方法に起因して、乳頭探索・装着過程においてチューブ等の絡みや既装着のカップとの干渉を回避するためである。第2に分房ごとの泌乳特性、すなわち一般的に後乳区の方が前乳区に比して泌乳量が多いことから(HOGEWERFら, 1998; HONDAら, 1998)、搾乳終了まで各分房間で極端な時間差を生じないように装着順を決めることによって、ミルクユニット全体の占有時間をより短縮する必要がある。

後乳頭への装着作業が完了次第、前乳頭用カップホルダを上昇させて、後乳頭と同様の動作を行う。エンドエフェクタはティートカップをホルダから引き出してから、昇降機を教示Z座標まで上昇させた後、エンドエフェクタを教示XY座標まで移動させる。乳頭探索モードを実行する際には、モータ停止時のハンチング防止のために整定時間として0.2sを設ける。続いて、乳頭追従モードを実行し、位置が定まった時点で乳頭の検出位置を中心としてマニピュレータをリサージュ波形状に揺動・上昇させながら、カップの吸着動作を行う。これらの動作アルゴリズムについては第6章で述べる。

ティートカップ内の真空度が設定値に達すると、"装着完了"と判断してエンドエフェクタはカップを解放し、次のカップのマニピュレーションに移行する。カップを一定量上昇させて設定値に達しない場合は乳頭探索での昇降位置から一定量低い位置まで一旦下降させ、再度上昇させる過程で乳頭を検出したら瞬時に昇降動作を停止する。また、装着完了時には逐次当該装着位置座標のフ

ァイル書込みを行う。全てのカップ装着作業が終了した段階で、マニピュレータは基本姿勢を経由して展開時と逆経路を辿って初期姿勢に退避する。一方で、昇降機は50mm程度上昇するとともに、カップ保持アームは全てのホルダを上昇させて搾乳終了まで乳房下でティートカップの離脱・落下を待機することとなる。

搾乳中においては、乳汁の流出状態に応じた拍動制御や搾乳終了検知等特段の搾乳プロセス制御は当面行わないものとした。ミルクチューブ内の乳汁の流出状況を目視で確認して、搾乳終了と判断した時点でPCへのキー入力により、真空解除してからカップ内へ圧縮空気を3.0s間送入してカップを強制的に離脱させる。全てのカップがホルダに収納された後、マガジンアームは初期姿勢に退避して終了する流れとする。

#### 4-5 摘要

本章では、繋ぎ飼い用搾乳ロボットを一種の作業移動型ロボットとして位置付けてその設計指針を示した。すなわち、牛舎内でのストール間移動においては比較的単純な移動機構が舎内上方空間に敷設した軌道上を走行することにより達成できる。しかし、移動機構に搭載したロボット機械系がストール内で牛に追従しながらティートカップを装着するためには、牛の特性を最大限に考慮した、対牛親和性の高い上記移動機構とは別の移動機能を付与する必要がある。こうした条件に基づいて機械システムの構成要素を検討し、構築した。

1) 本システムは、作業移動型ロボットとして牛舎上方空間に配した分岐レールを移動する台車、その下面にローラによって懸架した牛体位置追従機構、およびその片側に搭載する自動搾乳ユニット(総質量20kg)で構成される。

これら機械系は、牛の頸部を支点としてX-Y平面内で扇状に回転する牛の両腰角と両坐骨端の4点を保持し、コンピュータ制御を介さずに牛体の大きな動きに追従することができる。これによって、本システムは牛体とロボット機械系のX-Y平面内における相対位置関係を確保し、作業座標系が設定される。その上で、乳頭の位置変動を実時間処理してティートカップ装着を行う機構を考案した。

2) 自動搾乳ユニットは、4本のティートカップを収納

するマガジンアームと光電スイッチを幾何学的に配列したローカルセンサをエンドエフェクタ直上に搭載したACサーボモータ駆動の平面3自由度マニピュレータから構成される。マニピュレータのリンク長等の基本仕様は第3章での検討結果に基づいた。さらに、マニピュレータの駆動用アクチュエータは、各関節軸の負担軽減と軽量化に向けて適正化を図った。また、カップ装着から自動離脱過程に至る基本動作アルゴリズムを提示した。

## 第5章 乳頭追従制御系とロボットマニピュレータの可操作度

### 5-1 緒言

前章では、牛体位置追従機構を基軸とする本システムの構成要素と作業の流れを提案した。本機構に取り付けた自動搾乳ユニットは、牛体の動きに対して一定範囲内の位置精度を維持する。しかし、乳頭先端位置は乳房の揺れに伴い変動する。乳頭の動きに追従してロボットを制御するためには、乳頭位置を把握する手段として透過型光電素子を幾何学的に配列した矩形フレームの中に乳頭を包囲し、各素子のon-off情報をもとに乳頭への追従を図る。

ロボット設計においては、ロボット作業領域において乳頭の動きをローカルセンサシステムで認識し、それを実時間のサーボループに直接組み入れる。しかし、実際にはロボット機構に組み込んだアクチュエータやサーボコントローラや機構部分の動特性などにより、サンプリング周期が0に漸近するシステムは困難であり、軽量なマニピュレータを用いて、乳頭の動きに追従可能な制御系を構築する必要がある。このとき、ロボット作業をする上で四肢は動的な障害物であり、実時間でこれを回避しながら手先位置決めを行うために、機構的な冗長性を用いて乳頭への接近を図る。また、手先の位置や姿勢を制御するに当たって、マニピュレータの操作能力を定量的に考察する必要がある。これらを踏まえて、本章では以下のような構成とする。

まず、5-2においては常に運動する乳頭をローカルセンサで検出し、時々刻々のマニピュレータ手先の目標軌道を生成するための位置情報の算出方法を述べる。マニピュレータシステムの周波数応答特性に基づいて得られ

たパラメータをもとに、デジタルサーボを組む際にどの程度のサンプリングレートで位置フィードバックを行えばよいかを5-3で考察する。また、5-4ではマニピュレータを乳頭へ接近移動させる場合、手先の位置や速度を与えてそれを実現するための関節変数の位置や速度を求める逆運動学問題を解析的に提示した。このとき、姿勢に一定の拘束条件を与えることによって、問題を簡易化した。5-5では、マニピュレータの任意姿勢作動領域とこれに含まれる乳頭の存在領域を提示し、特に後者のどの位置でマニピュレータが高い操作能力を発揮するかを検証した。すなわち、その定量的な測度として可操作度を取り上げ、これが自由度の配置やリンク長などの機構の基本設計や制御およびカップ装着作業のプランニングに有益な評価指標であると考えた。

以上のように、本章では、X-Y平面内に限定しての乳頭位置検出とロボット追従制御系の設計方法を示すとともに、可操作度の観点からマニピュレータ機構の牛体への適応性について検討した結果を述べる。

### 5-2 乳頭位置の検出・推定方法

ローカルセンサは、前章で示したように、矩形フレーム内側に透過型光電素子を幾何学的に配置して、その領域内に乳頭1本を包囲する。その位置から、その時刻の軌道の値を毎制御周期計算して、乳頭がセンサ領域内中心に合致するように乳頭の動きの変化に即座に対応した軌道を生成する。ローカルセンサフレーム内に配列した光電素子の座標をそれぞれ図5-1と表5-1に示す。

図5-1において、光電素子を配列したローカルセンサフレーム内側のXとY軸方向の寸法はそれぞれ $XW=80.0\text{mm}$ と $YW=33.0\text{mm}$ であり、カップ装着時の目標位置座標はX軸上ではの目標（中心）位置座標 $AW=34.0\text{mm}$ である。

乳頭の半径 $r_r$ は、乳頭直径の最小値と最大値をそれぞれととして次の範囲とした。

$$r_r = D_{rmin}/2 \sim D_{rmax}/2$$

ここで、 $D_{rmin}=10.0\text{mm}$ 、 $D_{rmax}=55.0\text{mm}$ と設定した。

10個の光電素子のon-off情報 $u$ （1024通り）は、16ビットデータとして以下のようなビット配置とした。

素子No. 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0  
 on-off情報u 0 0 0 0 0 0 x x x x x x x x x x

上記データをもとに、コンピュータでローカルセンサによる乳頭検出を以下の手順でシミュレートして、予測されるすべてのon-off情報uに対応する推定位置のルックアップテーブルXr[1024]とYr[1024]を作成した。

- ①Xr[1024], Yr[1024]および総データ数Nr[1024]を用意してクリアする。
- ② $r_r = \frac{D_{rmin}}{2} \sim \frac{D_{rmax}}{2}$ ,  $y_r = YW - r_r \sim -YW + r_r$ ,  $x_r = r_r \sim r_r + XW$ の範囲において乳頭半径と乳頭位置についてそれぞれ刻み0.5で以下を実行する。

半径rrの乳頭がローカルセンサ内の位置(xr, yr)にある場合のon-off情報uをシミュレーションにより算出し、以下の演算を行う(式はC言語で記述)。

- Xr[u] += xr : X座標平均値算出用の総計
- Yr[u] += yr : Y座標平均値算出用の総計
- Nr[u] += 1 : 総データ数の算出

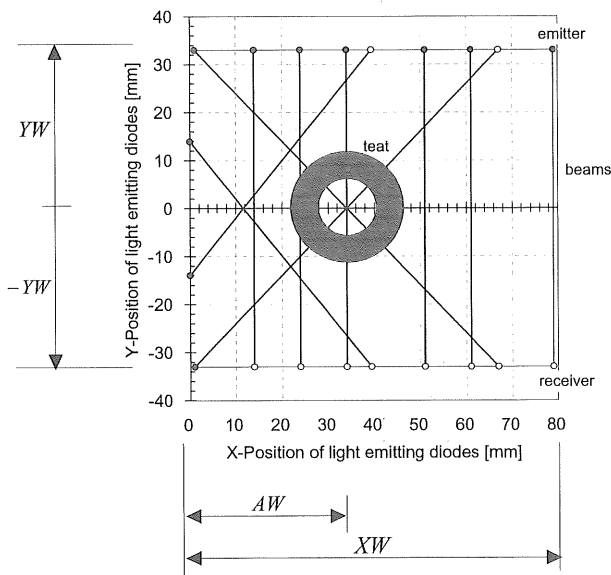


図5-1 上面からみたローカルセンサの概要

③uを0~1023まで刻み1で以下を実行する。

もし、Nr[u]>0なら

$$Xr[u] = \frac{Xr[u]}{Nr[u]} \tag{5.1}$$

$$Yr[u] = \frac{Yr[u]}{Nr[u]} \tag{5.2}$$

上式によって、Xr[u]とYr[u]にはon-off情報uが得られるときの乳頭位置の平均値がセットされる。実際のローカルセンサ情報uについては、Xr[u], Yr[u]を乳頭の推定位置とする。ただし、Xr[u]とYr[u]がともに0なら指定したuはエラーデータとする。

図5-2にマニピュレータ制御における乳頭位置推定ルーチンを示す。ローカルセンサ値の取得に際しては、チャタリングを防止するためのアルゴリズムとして、実験においては待機時間tw=50μs, 行程数n=3回と設定した。

マニピュレータの運動の目標値としては手先の位置姿勢を表すベクトルrの目標値raをとる。手先目標値raは、その動作中に修正しなければならない場合が多く、後述の(5-13)式の逆運動学計算を実時間で行う必要がある。手先位置は、個々の関節変位から空間内に固定されたある作業座標系により記述され、ローカルセンサ出力uに基づいて目標とするロボット手先位置のXY座標を推定する。よって、基本的な制御構造としては、「入力A：現在の関節変位やローカルセンサ値の入力, 処理B：次の関節変位の算出, 出力C：次の関節変位の出力」で構成される。

### 5-3 マニピュレータの追従制御系

#### 5-3-1 マニピュレータの動特性

前章で示したように、独自開発したマニピュレータ機構は動特性への反映をねらいとして質量を約5kgに軽量化している。まず、マニピュレータ機構の基本的な動特性を評価するために、サーボループからセンサフィードバックの部分を除いた開ループでの周波数応答を測定し

表5-1 センサフレーム内の光電素子取付け位置座標

素子No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
投光素子X座標 [mm]	79.0	1.0	61.0	51.0	0.0	34.0	24.0	14.0	1.0	0.0
投光素子Y座標 [mm]	33.0	-33.0	33.0	33.0	-13.9	33.0	33.0	33.0	33.0	13.9
受光素子X座標 [mm]	79.0	67.0	61.0	51.0	39.4	34.0	24.0	14.0	67.0	39.4
受光素子Y座標 [mm]	-33.0	33.0	-33.0	-33.0	33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0

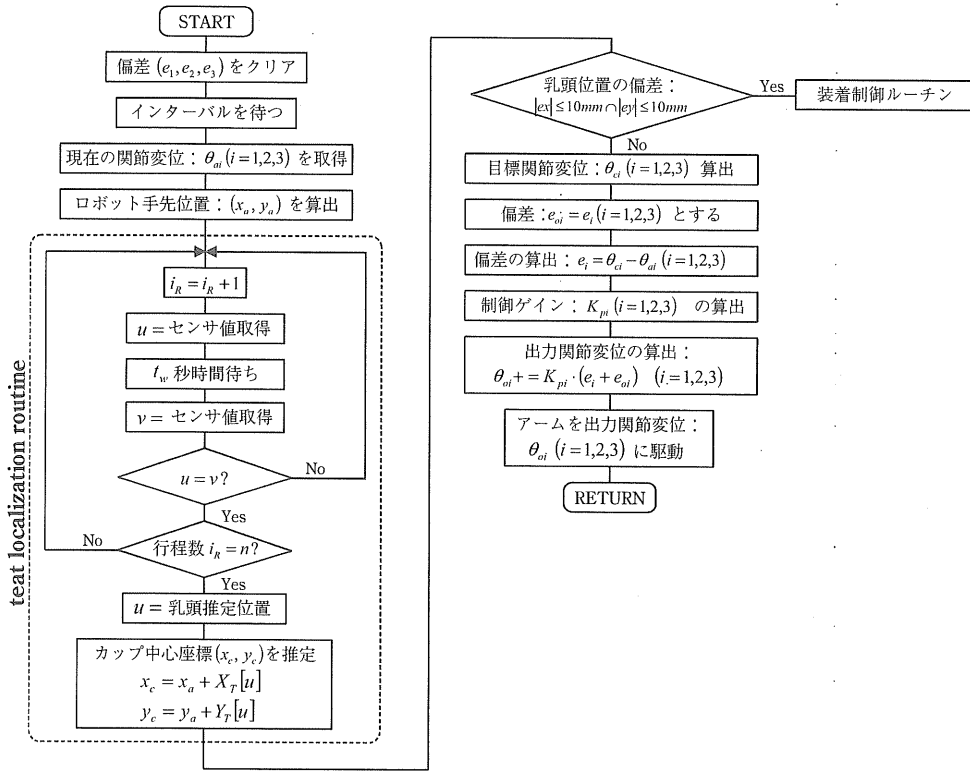


図5-2 乳頭位置推定ルーチンを含む乳頭追従制御フローチャート

た。このなかにはアクチュエータやサーボコントローラ、アーム機構部分の動特性が含まれている。

実験では後出図5-7に示すように、マニピュレータ姿勢を基本姿勢（4-4-2参照，各アームの関節 $\theta_1$ ， $\theta_2$ および $\theta_3$ をそれぞれ $45^\circ$ ， $90^\circ$  および $45^\circ$ ）に固定して行った。エンドエフェクタにはカップ1本（質量：430g）を把持させて，測定対象とする関節以外をロックした。その上で，個々の関節に対して追従する目標経路として振幅 $3^\circ$  と $5^\circ$  の正弦波を与えることにより，各関節単独の特性を同定した。正弦波の周波数は0.2~6.0にかけて0.2Hz刻みで変化させてその周波数応答を求めた。このときのサンプリング周波数は50Hzとした。なお，実験は図5-3に示すように，ロボット昇降軸を牛体位置追従機構ではなく，試作ベンチスケールの架台に固定して行った。測定結果を図5-4に示す。グラフの第1並びに第2数値軸は，アクチュエータに与えた位置指令に対して，実際に得られた位置のゲインと位相遅れをそれぞれ示している。破線が振幅 $3^\circ$ ，実線が振幅 $5^\circ$  の応答を表している。

グラフ中に点線で引いた $-90^\circ$  と位相曲線の交点か

ら，マニピュレータ第1~3関節軸の固有周波数 $f_{ci}$ は，それぞれ3.5Hz（時定数： $T_m=290\text{ms}$ ），4.5Hz（同： $T_m=220\text{ms}$ ）および4.5Hz（同： $T_m=220\text{ms}$ ）であることが分かる。また，第1~3関節軸の減衰係数 $\xi_i[-]$ は $\xi_1=0.7$ ， $\xi_2=0.5$ および $\xi_3=1.0$ とした。これらボード線図の特性を伝達関数 $G_{pi}(s)$ とすると，位置目標値から制御量までの伝達関数 $G_{pi}(s)$ は本実験で同定された位置制御ループの固有角周波数 $\omega_i (=2\pi \cdot f_{ci})[\text{Hz}]$ と減衰係数 $\xi_i$ を用いて，次式の

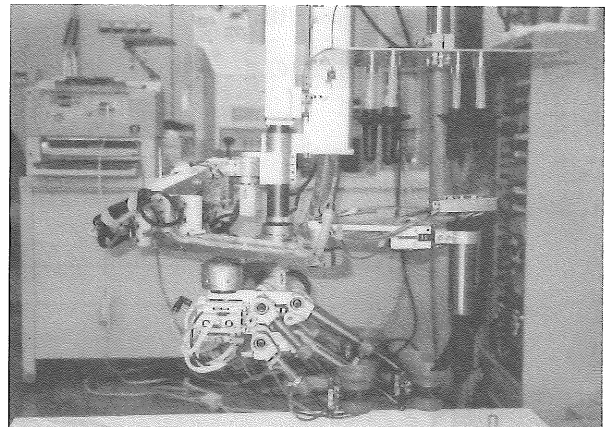


図5-3 正弦波追従実験

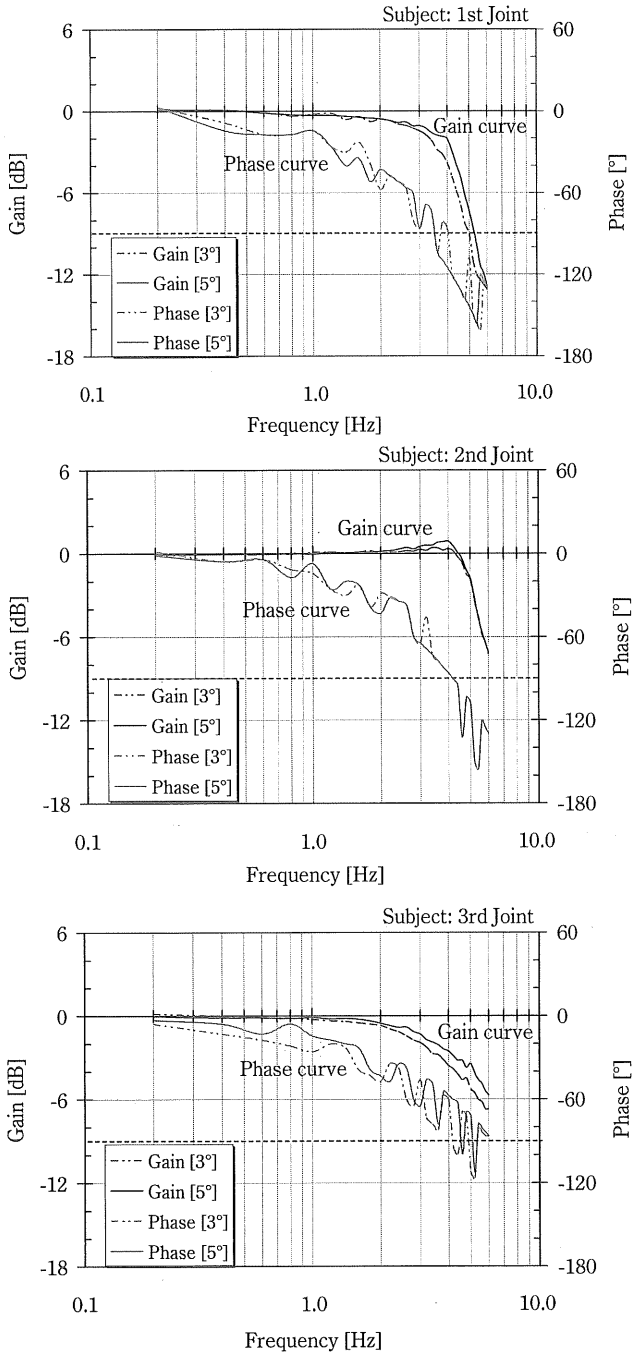


図5-4 各関節軸のボード線図

2次遅れ要素(金子, 1996)で近似することができる。

$$G_{pi}(s) = \frac{K_s \frac{1}{1 + T_v s}}{1 + \frac{K_s}{1 + T_v s} \frac{1}{s}} = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (5.3)$$

ここで,  $\omega_i = \sqrt{\frac{K_s}{T_v}}$ ,  $\xi_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{T_v \cdot K_s}}$  とする。ただし,  $K_s$  はシステムゲイン[1/s],  $T_v$  は応答時定数[s]である。

実用面の要求から通常応答が振動的にならない臨界減衰の応答が求められる(精密工学会, 2000)が, 本システムでは実際の設計に当たって実験で得られた位置制御ループの応答周波数の仕様から位置制御ループの設計を行うこととした。次項ではその設計論を述べる。

5-3-2 乳頭への追従制御

各関節の制御装置は関節角を制御変数とするサーボ機構であり, 図5-5に示すような位置制御ループのブロック線図で考えることができる。一般に各関節間の相互干渉が想定されるが, ここでは, 簡略化のため干渉は無いものとする。前項の伝達関数 $G_{pi}(s)$ を位置制御するため, I型の積分制御を使用して図5-5(左)に示すループを構築した。図中位置制御ループ系の交差周波数を $f_{pi}$  ( $i=1, 2, 3$ ) とすると,  $f_{pi} \ll f_{ci}$  なら  $G_{pi}(s) \approx 1$  と近似できるため, 図5-5(右)に示すように簡略化できる。

さらに,  $X \rightarrow \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{pi}} \cdot s} \rightarrow Y$  となる。ここで伝達関数  $G_{pi}(s)$  を

$$G_{pi}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{pi}} \cdot s} \quad (5.4)$$

とおき,  $[s] = 2\pi \cdot f_{pi}$  として

$$\frac{1}{K_{pi} \cdot s} = 2\pi \cdot \frac{f_{pi}}{K_{pi}}$$

$$\therefore K_{pi} = 2\pi \cdot f_{pi} \quad (5.5)$$

が成立する。ここに,  $K_{pi}$  は位置ループゲインである。

実際には前出の固有周波数 $f_{ci}$ をもとに, ゲインレート  $K_{pi} = 10$  ( $i=1,2,3$ )として,

$$f_{pi} = \frac{f_{ci}}{K_{pi}} \quad (5.6)$$

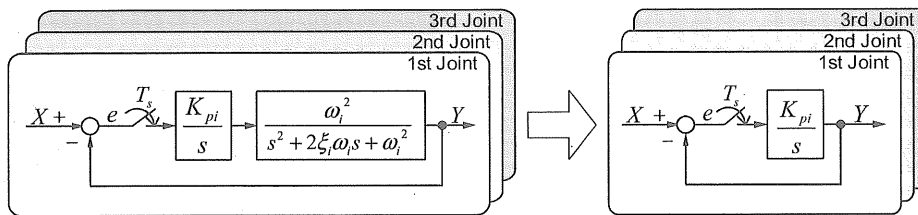


図5-5 乳頭追従制御ループのブロック線図

から $K_{pi}$ を少しずつ下げながら実機の動作性を観察した。その結果、 $K_{p1}=K_{p2}=K_{p3}=5$ が安定的となり、 $f_{p1}=0.7\text{Hz}$ 、 $f_{p2}=f_{p3}=0.9\text{Hz}$ と決定した。すなわち、マニピュレータは3軸がシリアルに連結されていて、設計目標として軽量化を優先させたことから剛性は低く、アーム単体の $f_{ci}$ よりも低めの値にする必要があったと考えられる。しかし、KLOMPら(1990)は、現在市販されている搾乳ロボットシステムの制御系設計において、乳頭挙動の帯域幅を1Hzを上限として基礎特性を確認した上で、牛を供試した実用試験でも良好な追従性能であったことを報告している。SCHILINGMANNら(1993)は、通常の立位状態において0.3~0.5Hzの周期で乳頭に小さな動きが認められたとしている。さらに、乳頭の経時的な位置変動を調査した筆者らの調査結果(1996)では、肢の踏み変え等の場合に帯域幅0.8Hzを観測したものの、通常の呼吸等に伴う乳頭共振においては上記と同様0.3~0.5Hzに留まった。これらより、設定した交差周波数 $f_{pi}$ の本システムでは、乳頭の動きに対してほぼ十分な追従性能が得られると判断した。

なお、 $T_s$ をサンプリングタイム[ms]として、 $K_{pi}/s$ を双一次変換法により、

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (5.7)$$

と置き換えると、

$$Y[n] = Y[n-1] + \frac{K_{pi} \cdot T_s}{2} \cdot (e[n] + e[n-1]) \quad (5.8)$$

で離散化される。

制御用計算機のプログラム上では、(5.8)式の差分方程式で積分制御を行った。また、ローカルセンサの検出領域中心から乳頭中心までの距離を $r (= \sqrt{ex^2 + ey^2})$ [mm]とすると、 $r$ が大きい場合は乳頭の推定位置偏差が大きくなり不正確になるため、位置ループゲイン $K_{pi}$ を小さくしないと動作が不安定になった。そこで、実際の追従動作の観察から、ローカルセンサ中心からセンサフレーム内側までの距離を $YW$ [mm]とすると、

$$\frac{K_{pi-max} - K_{pi-min}}{r_{min}} = \frac{K_{pi} - K_{pi-min}}{r_{min} - r} \quad (5.9)$$

となり、

$$er = \frac{r}{r_{min}} \left( = \frac{r}{0.3 \cdot YW} \right), K_{pi-max} = 2\pi \cdot \frac{f_{ci}}{5}, K_{pi-min} = 2\pi \cdot \frac{f_{ci}}{7} \text{として、}$$

$$K_{pi} = K_{pi-max} - er \cdot (K_{pi-max} - K_{pi-min}) \quad (5.10)$$

で表す可変ゲイン(図5-6)にすることによって、良好な乳頭への追従性を実現した。

すなわち、(5.10)式はローカルセンサ中心からのずれ $r$ が $0.3 \cdot YW$ 未満なら位置ループゲイン $K_{pi}$ は $K_{pi-min}$ から $K_{pi-max}$ までの値を、 $0.3 \cdot YW$ 以上なら $K_{pi-min}$ を採用することを示す。

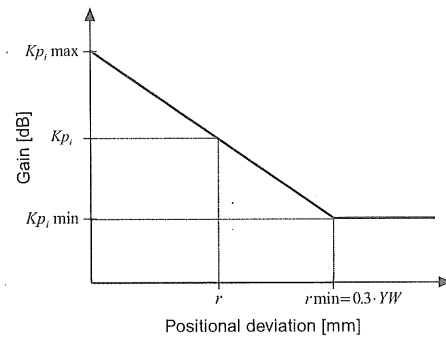


図5-6 ローカルセンサ内位置偏差に対応した可変ゲインの概念

### 5-3-3 サーボ制御系におけるサンプリング周波数

ロボットの制御レートは、機械系が有する固有振動数 $1/T_m$ に対して、最も下位の関節サーボのサンプリング周期 $T_s$ が満たすべき条件として $T_s < T_m/10$ 程度が必要である。これをこの実験で用いたロボットシステムに適用すると、 $T_m/10 \cong 25$ [ms]となる。サンプリング角周波数 $\omega_s (= 2\pi/T_s)$ を決定する手始めとして、できればシステムの希望バンド幅の5~10倍以上に取るのが一応の目安である(金井ら, 1992)。また、時間領域においてシステムの立ち上がり時間の中に5~10サンプル以上あるようにサンプリング周波数 $f_s$ を選定するのが一般的である。さらに、阿部(1992)や須田ら(1988)の方法をも考慮して次式を導出した。

$$10 \cdot f_{ci} \leq f_s \leq 20 \cdot f_{ci} \quad (5.11)$$

これより、本システムでは、 $f_s = 1/T_s = 50\text{Hz}$  ( $T_s = 20\text{ms}$ )と決定した。なお、STREETら(1992)が開発したロボット制御系設計においてもサンプリング周期を20msとしてシステムを構築している。実際、模擬乳頭を用いてセンサ情報をサーボループに組み入れたときの動作性を確認した結論からすれば、センサフィードバックの遅れの影響はほとんどなく、乳頭の動きの変化には対応できると考えられた。結果として、本システムによる乳頭追従性はこれまでに開発された搾乳ロボットシステムとほ

ば同等であると思われる。一般にセンサフィードバックの遅れを補償する手段として、対象の動きを予測する方法がとられるが、本研究のように対象の動き自体が高速かつ予測不可能な場合には有効ではない。

5-4 マニピュレータの運動学

5-4-1 目標手先位置を実現する関節変位の算出

一般に、 $n$ 自由度マニピュレータの各関節角と手先位置との関係は

$$r = f(\theta) \tag{5.12}$$

によって表す。ここで、エンドエフェクタ状態ベクトルを  $r = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T$ 、マニピュレータ全体の姿勢を表す関節変数ベクトルを  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$  ( $m \leq n$ ) とする。関節変数ベクトルが与えられたときには、対応する  $r$  は一意に定まり、計算は容易である (吉川, 1988)。しかし、本システムではローカルセンサ情報に基づいて与えられた  $r$  に対して、それを実現する関節変数ベクトル  $\theta$ 、すなわち (5.12) 式を満足する  $\theta$  を求める必要がある。この解は形式的には

$$\theta = f^{-1}(r) \tag{5.13}$$

と記述できる。

図5-7は、本システムで扱う平面3自由度の回転関節を有する多関節型マニピュレータのモデルである。ここでは、アームによる後肢への干渉や衝突を回避することによって牛と機械系双方の安全を図るとともに、ローカルセンサによる乳頭検出を容易にするために、マニピュレータが基本姿勢に展開した後は、エンドエフェクタが向きを変えずに牛体 (X) 軸に対して常に平行な姿勢を

維持するよう、第3関節軸に拘束条件を設ける。すなわち、エンドエフェクタの平面内での位置のみならず姿勢も問題とすることから、 $m=3$ として定式化する。 $l_1, l_2$  および  $l_3$  は、それぞれ第1, 2および3アームのリンク長、 $r = [x, y, \alpha]^T$ 、 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ とした場合の順運動学問題 (5.12)式は、

$$x = \sum_{i=1}^3 l_i \cos\left(\sum_{k=1}^i \theta_k\right) \tag{5.14}$$

$$y = \sum_{i=1}^3 l_i \sin\left(\sum_{k=1}^i \theta_k\right) \tag{5.15}$$

$$\alpha = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \tag{5.16}$$

と書ける。

実システムでは、(5.13)式の逆運動学によってローカルセンサに基づくルックアップテーブルのデータから第1関節軸と第2関節軸の2関節で位置決めし、第3関節軸の1自由度で姿勢を決定して各関節変位を計算するが、基本的には2自由度機構の問題として解析的に導出することができる。すなわち、手先位置  $P$  の平面座標を  $(P_x, P_y)$  とすると、第3関節軸の位置が  $(P_x + l_3, P_y)$  にあるとき、(5.14)式と(5.15)式は、

$$P_x + l_3 = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{5.17}$$

$$P_y = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{5.18}$$

と置き換えることができる。

(5.13)式については、 $r$  が  $(l_1 - l_2)^2 \leq (P_x + l_3)^2 + P_y^2 \leq (l_1 + l_2)^2$  を満足するならば  $\theta$  が存在する。(5.17)と(5.18)の両式から三角関数の加法定理を利用して

$$2l_1 l_2 \cos\theta_2 = (P_x + l_3)^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2 \tag{5.19}$$

$$2l_1 l_2 \sin\theta_2 = \pm \kappa \tag{5.20}$$

関数  $\arctan2$  を用いて、(5.19)と(5.20)式より

$$\theta_1 = \arctan2(P_y, (P_x + l_3)) \mp \arctan2(\kappa, (P_x + l_3)^2 + P_y^2 + l_1^2 - l_2^2) \tag{5.21}$$

$$\theta_2 = \pm \arctan2(\kappa, (P_x + l_3)^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2) \tag{5.22}$$

$$\theta_3 = \pi - (\theta_1 + \theta_2) \tag{5.23}$$

と求まる。

ここで、 $\kappa = \sqrt{((P_x + l_3)^2 + P_y^2 + l_1^2 + l_2^2)^2 - 2(((P_x + l_3)^2 + P_y^2)^2 + l_1^4 + l_2^4)}$  であり、復号は図5-7の二つのアーム姿勢を表している。なお、「 $\arctan2$ 」は計算機プログラム言語の関数  $\tan^{-1}$  を一意に与えるためのサブルーチン名に由来するものである。

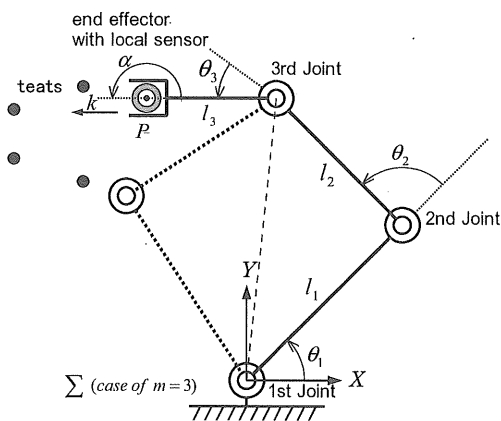


図5-7 平面3自由度の回転関節型マニピュレータモデル



## 5-4-2 与えられた手先速度を実現する関節角速度の算出

マニピュレータは、常に不規則に運動する乳頭に追従してセンサ領域内に捕捉する必要がある。PTP制御では、多くの中間点を指定しないとマニピュレータの一部が後肢に衝突する危険が生じる。そこで、本研究ではローカルセンサの位置情報に基づいてマニピュレータを前述のサンプリング周期でCP制御する。Y軸方向の回転関節によって作られるX-Y平面内で、手先の姿勢を維持しながら、牛体軸と平行方向に等速移動する場合の各関節角速度を求める。これは、広義の逆運動学問題の一つといえる。

(5.17)と(5.18)式について $P_x$ ,  $P_y$ ,  $\theta_1$ および $\theta_2$ を時間 $t$ の関数と考えて $t$ で微分する。図5-7中のエンドエフェクタ内の点Pが、X軸と平行姿勢を保ちながら一定速度 $k$ で運動するとき、

$$\frac{d(P_x+l_3)}{dt} = k \quad (5.24)$$

$$\frac{dP_y}{dt} = 0 \quad (5.25)$$

である。 $\dot{\theta}_1 = \frac{d\theta_1}{dt}$ ,  $\dot{\theta}_2 = \frac{d\theta_2}{dt}$ とおくと、(5.17)と(5.18)式より

$$\{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_1 + \{l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_2 = -k \quad (5.26)$$

$$\{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_1 + \{l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_2 = 0$$

を得る。この連立方程式を解いて、

$$\dot{\theta}_1 = \frac{k \cos(\theta_1 + \theta_2)}{l_1 \sin \theta_2} \quad (5.27)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{-k \{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\}}{l_2 \sin \theta_2} \quad (5.28)$$

$$\dot{\theta}_3 = \frac{d}{dt} (\pi - \theta_1 - \theta_2) \quad (5.29)$$

$$= \frac{k \cos \theta_1}{l_2 \sin \theta_2}$$

を得る。なお、 $\theta_2 = 0^\circ$  または  $\theta_2 = 180^\circ$  の状態では特異姿勢となり、上記のような運動は行えないので、 $\sin \theta_2 \neq 0$  を前提とする必要がある。また、実際のエンドエフェクタの水平移動速度は、XY軸方向ともに150mm/sと設定した。

## 5-5 マニピュレータ機構の評価

エンドエフェクタが乳頭に接近してティートカップを装着する際、手先の位置および姿勢の操作能力が高いほ

ど、迅速な作業が可能となる。そこで本節では、手先位置による可操作度 (measure of manipulability) の違いを客観的に評価することは重要と考え、これを指標 (吉川, 1983; PAUL, 1984; 岡本ら, 1992; 有馬ら, 1994; KONDOら, 1998) として以下により検討した。可操作度は、関節角度の変化に対する手先位置変動の「感度」、あるいは特異姿勢からの遠さ (三河ら, 1999) を意味していると解釈できるが、動力学的要素は考慮せずに、運動学的な観点からのみマニピュレータの機構性能をながめるものである。すなわち、可操作度は関節駆動速度とアーム先端の移動速度の比に相当するもので、可操作度が大きいということは運動学的に先端速度を上げられることを意味する。高野 (1986) によれば、「作業空間全体で可操作度が大きく、かつばらつきができるだけ小さいということが作業し易さの一つの尺度になり得る。」としている。

ここで、問題の複雑化を避けるために以下の仮定を設定する。

(1) マニピュレータ本体は、牛体位置追従機構の昇降軸を介して取り付けられているため、本機構の牛体保持により作業座標系が固定される。

(2) 各リンクはすべて剛体とする。

(3) マニピュレータの運動をX-Y平面内に限定する。

手先位置Pは、前出の(5.17)と(5.18)の両式より、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{dP_x}{dt} \\ \frac{dP_y}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_2 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \end{bmatrix} \\ &= J(\theta) \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.30)$$

可操作度を $\omega$ とすると、

$$\omega = \sqrt{\det \{J(\theta)J^T(\theta)\}} = |\det \{J(\theta)\}| = l_1 l_2 |\sin \theta_2| \quad (5.31)$$

(5.31)式から、 $\theta_2 = \pm \frac{\pi}{2}$  のとき $\omega$ は最大( $\omega_{max} = l_1 l_2$ )となる。この最大可操作度 $\omega_{max}$ に対する可操作度の割合 $\beta$ を、

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_{max}} \quad (5.32)$$

とおくと、(5.20)式より

$$\beta = |\sin \theta_2| = \frac{k}{2l_1 l_2} \quad (5.33)$$

である。そこで、可操作度の割合が $\beta$ であるような手先位置の座標( $P_x, P_y$ )を求める。(5.33)式の両辺を2乗し、

$$k^2 = (2l_1 l_2)^2 - \{(P_x + l_3)^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2\} \quad (5.34)$$

を代入すると,

$$(Px+l_1)^2+Py^2=l_1^2+l_2^2\pm 2l_1l_2\sqrt{1-\beta^2} \quad (5.35)$$

となる。よって、座標 $(Px, Py)$ は中心 $(-l_1, 0)$ 、半径 $\sqrt{l_1^2+l_2^2\pm 2l_1l_2\sqrt{1-\beta^2}}$ の円周上であることが明らかである。

これに基づいて、図5-8に標準作業域(図中、Standard Workspace)内における可操作度の分布を示す。併せて、任意のアーム姿勢で到達可能な領域である任意姿勢作業領域(同Dexterous Workspace)(KUMARら, 1981)を示す。図に示すように、この領域は腹部から臀部にかけての牛体下方空間において、第3関節軸に与えた姿勢の拘束条件を満たしつつ、標準作業域を十分に含んでいることが分かる。

標準作業域(350×350mm)は、第3章で既述した結果をもとに乳頭間距離が最大に拡張する分娩直後について推定した乳頭の存在領域である。標準作業域の中心は、X軸方向においては坐骨端からの距離を約350mmとし、マニピュレータ台座中心からは約220mmと設定した。また、設計段階ではY軸方向では作業域中心から台座までの距離を、MAKINO(1985)によるスカラ型ロボットの設計指針を参考に約500mmと設定した。しかし、マニピュレータ台座は牛体位置追従機構で牛を保持した状態、すなわちY軸方向の相対距離は牛の腰角幅により変わり得る。図では、標準的な腰角幅を想定した可操作度と併せて、その最大値と最小値の牛を保持した場合のロボット可操作度を示している。図より、前後乳区あるいは左右の位置に拘わらず、マニピュレータは平

均的な配置の乳頭に対して任意の姿勢を維持しながらも、0.8以上の高い可操作度で到達可能であることが明らかである。さらに、標準作業域の中心近傍ではマニピュレータは90°となり、手先の可操作度が最大となる最適腕姿勢を使っており、可操作度の観点から最も望ましい作業位置であることが分かる。前述の作業域中心から台座までのY軸上での最適距離=500mmは、腰角幅がほぼ最大(=650mm)である牛を保持した場合の標準作業域中心位置となる。この場合の左側乳区の外側境界における可操作度は0.6未満と低いが、実際の乳頭配置の観点(例えばMILLERら, 1995)からすれば、適用外の領域と考えても差し支えないであろう。

吉川(1988)によれば、人間の腕を水平に保ち、手首の自由度を無視して腕を2関節リンク機構とみなした場合、両手で何か対象物を扱う際には肘の曲げ角がおおよそ90°となる腕姿勢を取る。本研究でも、図で明らかのように、最適アーム姿勢がカップ装着作業をする際の人間の右腕の姿勢とかなり類似していると思われる。これらのことから、構築した本システムは後肢による機械系への踏み降り等危険を回避した腕姿勢を確保しつつ、ティートカップ装着というタスクに対して機構の自由度、リンク長および台座位置の設定など機械的な設計仕様が適正であり、牛体への適応性は高いと判断した。

## 5-6 摘要

本章では、試作した搾乳ロボット機械系の運動制御系の設計に際して、周波数応答法による解析によって要素の特性を直観的に判読し、実際に即した特性を把握した。これを受けて位置ループ系の交差周波数とサンプリング周波数を決定することができた。

また、XY平面内におけるマニピュレータ機構の逆運動学問題を明らかにするとともに、機構の評価指標として手先位置による可操作度を取上げ、乳房にアプローチを図る機構設計の適応性を評価・検討した。以下に要約を示す。

1) マニピュレータ各軸に対する周波数応答を測定した結果、第1、2および3関節軸の固有周波数はそれぞれ3.5Hz、4.5Hzおよび4.5Hzであった。ゲインレートを5として、位置制御ループ系の交差周波数をそれぞれ0.7Hz、0.9Hzおよび0.9Hzと設定した。これま

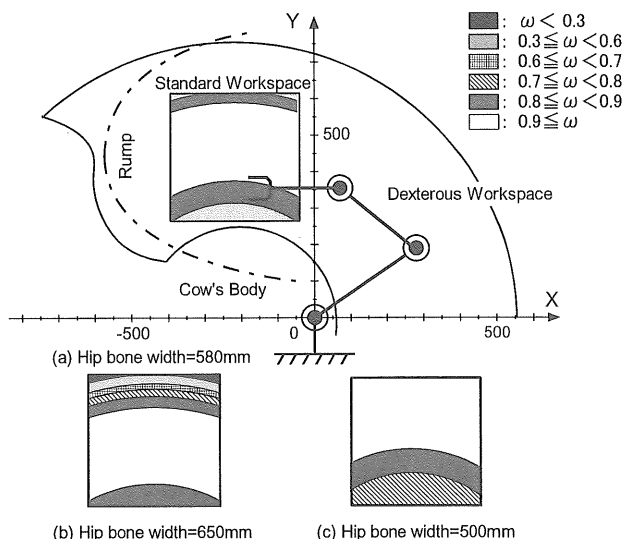


図5-8 牛体に対するマニピュレータの作業域と可操作度

での乳頭挙動に関する帯域幅と照合した結果、過不足なく追従可能な設定値であると判断した。

- 2) マニピュレータの乳頭接近に際して、後肢との干渉・接触を回避するために、第3関節軸を牛体と平行な姿勢を維持する拘束条件を設けた。これによって、腕姿勢を決定するための逆運動学問題は本質的には2自由度機構と同様であり、解析的に求め得る。
- 3) マニピュレータは、標準作業域においては上記拘束条件を維持しながらも、牛の体格、特に腰角幅や乳頭配置に拘わらず0.8以上の可操作度で到達可能であることを明らかにした。これより、機構設計時の基本仕様すなわちロボットの台座位置、自由度構成およびリンク長がほぼ適正であると判断した。

## 第6章 ティートカップ装着アルゴリズムとシステムとしての適応性

### 6-1 緒言

搾乳作業におけるマニピュレーションの対象は、軟らかく変形しやすく、傷つきやすいデリケートな乳頭である。乳房から乳汁を体外に取り出すには、乳房清拭による搾乳刺激を与えた後にティートカップ（以下、カップ）を装着する必要がある。装着に際しては、速やかにかつカップ内に無駄な空気を吸い込ませないことが注意点である。また、乳頭先端部への不用意な接触を極力少なくして病原菌による汚染を回避しなければならない。人間が行うカップ装着においては、カップ孔から乳頭端までのXYZ軸各方向での相対距離を視覚情報に基づいて冗長性を有する腕でカップの位置決めをする。さらに、単純にカップを下から押し当てるのではなく、巧みにカップ孔中心を乳頭端位置に合致させる。このとき片方の手でミルククローを水平に持ち、カップ内に空気が流入しないようにライナーの尾部を折り曲げながら上に向けてカップを乳頭に吸い付かせる。これまでに試みられた装着手法において、カップと乳頭が接触しない程度に微小な上下振動を与えながら真空を適用する装着制御に関する研究が報告されている（STREETら、1993）。開発した搾乳ロボットシステムでは、ローカルセンサで位置決めされたXY座標の乳頭中心を原点に、微小な振動をエンドエフェクタに与えながら真空を適用するカップ装着を試みる。

本章では、開発した装着手法とこれを含むシステム全体の適応性について実搾乳試験から検証する。本章の構成を以下に示す。6-2では、ロボットに対する牛個体の乳頭位置情報のティーチング方法を述べる。6-3では、前章で述べたXY平面内でのロボットマニピュレータの位置決め動作に付加して、より確実に円滑な装着を目的に構築したZ軸上での運動制御則について検討する。6-4では、搾乳牛への馴致過程を含む実搾乳試験結果を通じて、これまでに構築したロボットシステム全体の作業性と牛への適応性について述べる。

### 6-2 乳頭位置のティーチング作業

従来の産業用ロボットに対するティーチングは、ロボットの学習機能を利用せず、再現性のみを期待していた。現在、普及段階にある既市販搾乳ロボットシステムでは、ジョイスティック等を用いて直接マニピュレータを動かす、対象とする牛個体ごとの乳頭位置をティーチングし、データベースを構築する（ALLENら、1992；DUCK、1992；HOGWERFら、1992；HEWITら、1993）。さらに、この内部データベースに基づいて目標運動を実現し、一旦自動装着に成功すると以降は学習して収束していく。また、内部データには前回装着に成功した位置が記録される。ロボット内部では過去約2週間分の乳頭位置のデータが保存されており、既市販搾乳ロボットシステムはその平均値を参照して動作を開始する。こうした学習能力をシステムに付加することによって、牛の生理的要因に起因する乳頭位置の変動に対し、機械システムの最適化を図っている。

本研究において開発した搾乳ロボットシステムにおいては、牛体位置追従機構によって牛体を保持して機械系と牛体との相対位置関係を確保した上で、牛個体の各乳頭位置をロボット管理システムに1本ずつティーチングすることとした。ここではリモートティーチング法により、ホストコンピュータを用いてキーボードの矢印キーにマニピュレータの動作方向を対応させた。←と→キーはX軸の各々+と-方向に90mm/s、↑と↓キーではY軸の各々+と-方向に同様の90mm/sの速度でJOG移動する。

以下の手順に基づき、当面は操作者が目視判断して乳頭位置のティーチングを行うものとした。

- ①各関節が原点出し済みであることをコンピュータ画面にて確認する。
- ②マニピュレータを初期位置へ移動する。
- ③ローカルセンサ下面から乳頭先端がやや突出する位置まで昇降機を上昇させる。
- ④XY平面において、ローカルセンサで乳頭を包囲できるまでエンドエフェクタを誘導し、位置を微調整する。一旦センサ領域で乳頭を保持すれば、センサフィードバックによる自律追従動作を実行する(第5章参照)。このとき、乳頭とセンサ中心との偏差( $ex, ey$ )が次式の条件を2.0s間満足したら、関節変数ベクトル  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \delta_1)^T$  を当該乳頭位置としてセーブする。  
 $|ex| < 10 \cap |ey| < 10$  (6.1)
- ⑤他乳頭に対しても同様に、③~④を繰り返す。
- ⑥4乳頭のティーチング作業が終了したら、マニピュレータを初期位置に退避させて、原点復帰を行う。

ロボットへのティーチング順序は、実際の装着シーケンスとは関連づけていないため、ティーチング操作しやすい個々の乳頭から順次行えばよい。ティーチングされた位置座標値は、ロボットによる乳頭探索動作の目標位置としてのみならず、マガジンアームの位置決め動作時の参照データとして用いられる。すなわち、装着時のカップマニピュレーションの迅速化と搾乳後のカップ自動離脱の際にホルダへの収納を容易にするため、マガジンアームのカップ保持部が当該搾乳牛の乳房下に適正に配置されていることが望ましい。そこで、個体ごとのティーチング位置に基づいてマガジンアームの展開角度  $\theta_M$  [rad] を制御した。マガジンアームは1自由度の旋回関節しか有していないことから、ここでは右前乳頭を目標として、ティーチングされたX座標に当該カップのX座標を合致させるように次式で  $\theta_M$  を算出した(図6-1)。

$$\theta_M = \arccos \left( \frac{X_M + X_c[3] - X[3]}{l_M} \right) \quad (6.2)$$

ここで、 $X_M$  はマガジンアーム台座中心のX座標[mm]、 $X_c[3]$  は任意に定めたマガジンアーム基本姿勢での右前乳頭用カップホルダのX座標[mm]、 $X[3]$  は同乳頭のティーチングX座標[mm]、 $l_M$  はマガジンアームのリンク長[mm]である。

マガジンアーム展開後は、ロボットのエンドエフェク

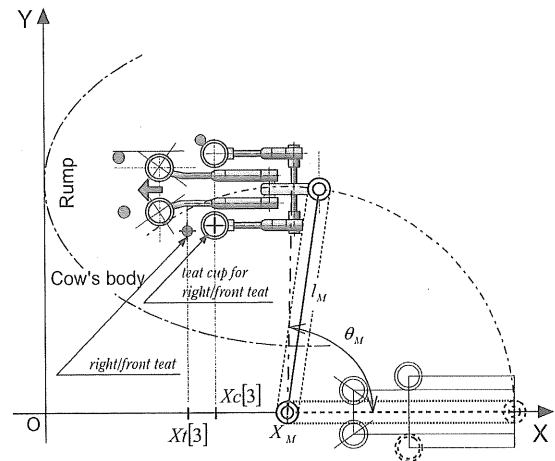


図6-1 乳頭位置データベースに基づくマガジンアーム展開動作の決定

タは次式で算出される当該カップホルダ位置( $x[n], y[n]$ )へ誘導され、カップを取出し・把持する。

$$\begin{aligned} x[n] &= X_M - l_M \cdot \cos \theta_M + X_c[n] \\ Y[n] &= Y_M - l_M \cdot \sin \theta_M + Y_c[n] \end{aligned} \quad (6.3)$$

ここで、 $Y_M$  はマガジンアーム台座中心のY座標[mm]、 $X_c[n]$  と  $Y_c[n]$  は、任意に定めたマガジンアーム基本姿勢における各カップホルダのX座標[mm]とY座標[mm]である。なお、 $n$  は乳頭番号(0,1,2,3)であり、順に左後・右後・左前・右前乳頭を意味する。

乳頭の位置座標データベースは、前回搾乳からの時間経過や泌乳期、および産次の経過に伴って乳頭配置が緩やかに変化することに配慮して更新する必要がある(LINDEら, 1992; MILLERら, 1995; 八谷ら, 2000)。今回のシステムで構築したティーチングデータベースには、前述のような乳頭位置の生理的変化を考慮した学習能力機能を付加していない。しかし、牛の自発的行動に依らない繋ぎ飼用の本システムにおいては、個体ごとに搾乳する時間帯や回数を計画的に設定できる利点を有する。本システムは、今後この点を生かすには牛個体ごとの履歴に応じて日内の乳房内圧の変化を予測する乳頭位置データ補正を行い、これに基づくロボット動作制御が望ましい。

### 6-3 ティートカップ装着アルゴリズム

カップ装着作業における乳頭の位置決めは、1) 牛体位置追従機構による牛体保持：牛体と機械系との相対位

置の把握, 2) データベースによる当該個体の乳頭位置座標の推定, 3) ローカルセンサによる乳頭位置の精査, の過程を経る。

乳頭位置の静的変動は乳房内の生理的反応や牛床での横臥状態による場面が多く, 一方, 乳頭位置の動的変動は肢の踏み換え, 呼吸や咳などによって軸方向に拘わらず予測不能な場面が多い。そこで, ローカルセンサを用いて以下の局所的乳頭探索を実行する。

### 6-3-1 乳頭探索手順

ティーチングされた当該牛の乳頭位置データに基づく昇降機位置を"zu", 乳頭探索時の乳頭検出昇降機位置を"m5"として, Z軸上での乳頭探索と装着過程は以下の手順で動作を進める (図6-2)。

- ① 乳頭端とローカルセンサが接触しないよう, 昇降機を"zu"から"SRCBZ"分だけ下降させる (探索開始位置: zu-SRCBZ)。
- ② 昇降機を最大上昇範囲"SRCHZ"分上昇させて乳頭検出を試みる (探索終了位置: zu-SRCBZ+SRCHZ)。
- ③ ②の過程で乳頭を検出した時点で, 上昇を停止して探索を終了する。このときの昇降機位置を"m5"として固定し, XY平面内でのセンサフィードバックによる自律追従動作に移行する。
- ④ 乳頭が検出されなければ, 再度探索開始位置"zu-SRCBZ"まで下降する。

- ⑤ 以下の順序でエンドエフェクタ中心位置のY座標をスライド (スライド量: SRCHY) させてから, 上記①~④を繰り返す。

Y-step1 対象乳頭T0・2の場合: +SRCHY, 同T1・3の場合: -SRCHY  
 →Y-step2 対象乳頭T0・2の場合: -SRCHY, 同T1・3の場合: +SRCHY  
 →Y-step3 Y-step2を再試行  
 →Y-step4 対象乳頭T0・2の場合: +SRCHY, 同T1・3の場合: -SRCHY

- ⑥ 上記①~⑤で対象乳頭が検出できなければ, 以下の順序でエンドエフェクタ中心位置のX座標をスライド (スライド量: SRCHX) させてから, 再度上記①~⑤を繰り返す。

X-step1 +SRCHX  
 →X-step2 -SRCHX  
 →X-step3 再度X-step2を試行  
 →X-step4 -SRCHX

X-step4までの試行過程を経て乳頭を検出しない場合に"乳頭探索失敗"とした。なお, ⑤の過程でローカルセンサの左右のフレーム外側に取り付けられた投下型光電素子 (Keyence製PS52, 図6-2参照) により物体 (乳頭) の存在を確認した段階で, 以下のY座標移動を優先した。

- ・フレーム左側光電素子作動 → +SRCHY
- ・フレーム右側光電素子作動 → -SRCHY

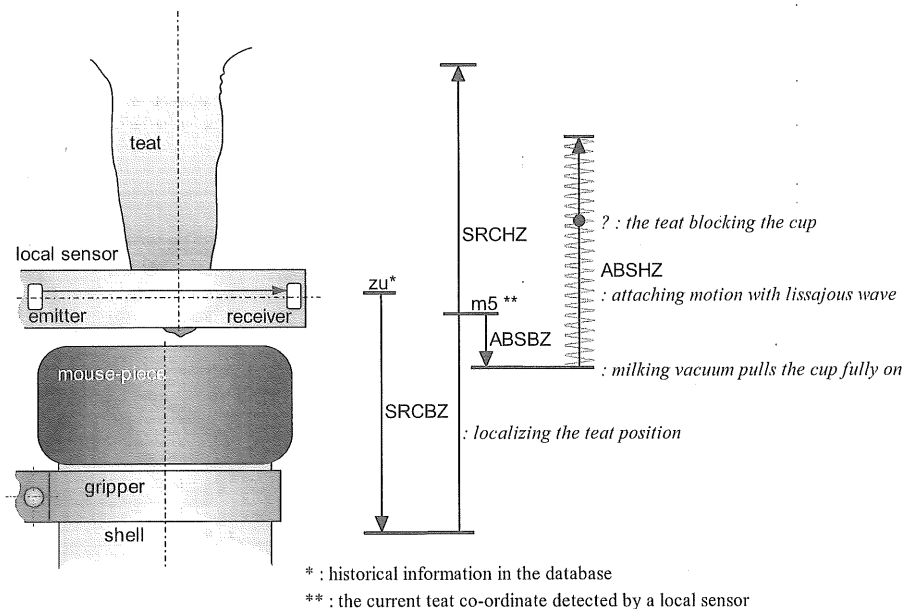


図6-2 乳頭探索とティートカップ装着アルゴリズム

実験では、上記SRCBZ, SRCHZ, SRCHXおよびSRCHYをそれぞれ50mm, 100mm, 25mmおよび25mmと設定した。また、ロボットの移動速度をX, Y軸方向ともにティーチング時の60%増の150mm/sに変更した。この設定速度は、これまでに開発された搾乳ロボットシステム(例えばSTREETら, 1992)と同等以上である。なお、上記X, Y, およびZ座標+と-の定義においては、X軸方向では臀部側を+, Y軸方向ではロボット台座側を+, およびZ軸方向では上側を+の方向と設定した。

### 6-3-2 ティートカップ装着手順

四肢の踏み換えなど時々刻々変わる牛体姿勢の変動により、前項③の位置m5においては、そのままでは乳頭端がカップ孔周囲のマウスピース面と接触し、折れ曲がる場合があり、結果としてカップへの円滑な乳頭挿入を妨げる要因となる。一方で、衛生面からは極端な接触による乳頭先端部の汚染を回避する必要がある。適切なカップ装着作業を実現するには、XY面内での一定の位置決め精度を確保しつつ、Z軸方向においては乳頭とマウスピース面を不用意に接触させずに、一定の接近状態を確保する必要がある。ロボットは、面取りされた柔軟構造の乳頭をφ20mmの孔に挿入させるためには、乳頭の軸倒れを起こさずに孔への物理的な横ずれを与えるか、カップ内への真空適用によりXY平面内の位置決め誤差を補償して装着する。本システムでは、これら相互の機能を補完的に行うために以下の運動制御則を構築した。

- ① ロボットは、昇降機位置において前述の乳頭検出昇降機位置“m5”から“ABSBZ”下降させた後にこの位置(真空適用開始位置:m5-ABSBZ)から最大上昇位置(真空適用終了位置:m5-ABSBZ+ABSHZ)まで上昇する。なお、この過程で電磁バルブを介して当該カップマガジンmgznの(nは乳頭番号)のミルクライン内に真空(設定閾値:48kPa)を適用する。
- ② ロボットは、エンドエフェクタ中心位置について検出された乳頭位置座標 $\theta=(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を原点として、 $Nr$ と $n$ をそれぞれ分割数と振動回数とすると、8の字型リサージュ図形を $\frac{\pi}{Nr}$ radずつ位相をずらした波形振動を $n \cdot Nr$ 回繰り返しながら上昇する(図6-3)。

振動データ成分 $(X_m, Y_m)$ [mm]は次式により生成される。

$$\begin{aligned} X_m &= M_x \cdot \sin(2\pi \cdot f_x \cdot t) \\ Y_m &= M_y \cdot \sin(2\pi \cdot f_y \cdot t) \end{aligned} \quad (6.4)$$

ここで、 $t$ : 時間[s],  $f_x$ : X軸周波数[Hz],  $M_x$ : X軸幅[mm],  $f_y$ : Y軸周波数[Hz],  $M_y$ : Y軸幅[mm]である。なお、実験では $f_x=2.0$ Hz,  $f_y=1.0$ Hzおよび $M_x=M_y=3.0$ mmと設定した。

座標回転させた位置 $(x, y)$ は、次式により振動成分 $(X_m, Y_m)$ を $\frac{n\pi}{Nr}$ [rad]回転した値とする。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{n\pi}{Nr}\right) & -\sin\left(\frac{n\pi}{Nr}\right) \\ \sin\left(\frac{n\pi}{Nr}\right) & \cos\left(\frac{n\pi}{Nr}\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

- ③ 下記のいずれかの状態を認識した時点で、“カップ装着成功”と判断してロボット昇降動作を停止する。

③-1: ローカルセンサで乳頭( $D_r=35$ mmと設定)とティートカップシエルの直径を識別する。

$$\text{シエル径} > D_r \quad (6.6)$$

③-2: 次式で算出するカップ内負圧閾値判定による。装着可否判定の閾値 $=K \cdot (V_s - V_o) + V_o$

ここで、 $K$ : 定数、 $V_s$ : 真空適用前圧力[kPa],  $V_o$ : 真空適用後圧力[kPa]である。

このカップ内負圧閾値判定には、10msごとの30個分の移動平均値を用いた。なお、 $V_s$ と $V_o$ はそれぞれ予め各カップの真空ラインに連結した電磁バルブ開閉時の圧力値である。

- ④ エンドエフェクタを“現在位置+振動データ成分 $(X_m, Y_m)$ ”に移動させる。

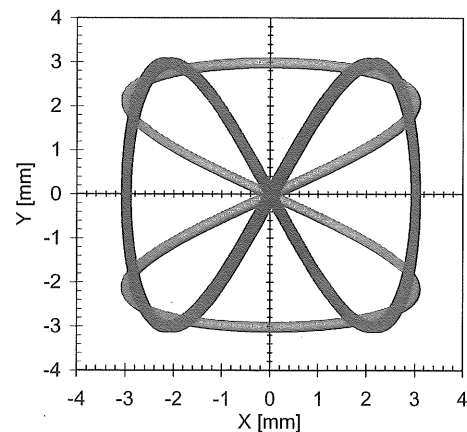


図6-3 乳頭先端を中心としたティートカップの振動軌跡

- ⑤ エンドエフェクタでカップシェル面を把握したまま、(6.8)式の往復運動で振動させながら位置m5に降下する。また、波形 $y$  [mm]が(6.9)式の条件を満たしたときに降下運動を終了する。

$$y = M_y \cdot \sin(2\pi \cdot f_y \cdot t) \quad (6.8)$$

実験では、 $M_y = 5.0\text{mm}$ 、 $f_y = 2.0\text{Hz}$ と設定した。

$$|y| < 0.2 \quad (6.9)$$

- ⑥ 位置m5への到達時点で真空圧が(6.7)式の圧力値に達したら"装着成功"と判断し、達していなければ再度①から繰り返す。

手順②では、ローカルセンサで検出しきれない乳頭端の傾斜や微小な運動に対して、カップ孔中心を乳頭端に嵌合しやすいようエンドエフェクタの運動制御則を試行的に適用した。基礎実験においては、幾分傾斜した模擬乳頭でもカップ孔内面に引っかかりさえすれば、"接触"から"挿入"へと作業状態が遷移するのを観察している。しかし、制御則の構築には直感的な部分が多く、一般性に欠けていることから、乳頭を一つの動体として捉えて実験的に本手法の有用性を評価する必要がある。

③に示した判定方法は、前者において乳頭が吸引されて装着を達成した場合、カップはグリップから浮上するので、ローカルセンサはカップのマウスピース側面あるいはシェル面を検出することとなる。後者では乳頭の挿入状況に応じた真空度の遷移を測定することにより、カ

ップ装着の成否が認識できる。ただし、空気流入によるカップ内残圧の程度により判定に要する時間は異なる。

⑤の運動過程においても、カップ内真空度の遷移状態を継続的に計測して、装着性に確実性をもたせた。なお、実験においては上記ABSBZとABSHZをそれぞれ10.0mmと60.0mmと設定した。

#### 6-4 搾乳牛に対するシステムの適応性

ロボットシステムについて、実験室内での基礎的な動作性、および搾乳牛を数頭供試して牛体位置追従機構単体で牛体を捕捉した際の反応を確認した上で、以下の自動搾乳試験を実施した。

試験に際しては、農林水産省畜産試験場（現畜産草地研究所（つくば））の実験牛舎内にロボット機械系を装備した実験用ストールを設置した。同試験場の搾乳牛は、日常的に対尻式スタンション牛舎で飼養、朝夕の搾乳はロータリ式ミルクングパーラで行われている。

試験に至るまでの馴致訓練においては、日常的な飼養管理に携わる熟練作業者がその都度牛舎から舎内ストールへ牛にストレスをかけないように誘導した。

供試牛の選定に当たっては、特に気質面に配慮するとともに、第3章の調査結果に基づいて、表6-1に示す2頭のホルスタイン種搾乳牛を実験に供した。両供試牛ともに2～3産と若産齢であり、また中期から後期に移行する泌乳ステージであった。よって、乳量も低下し、乳頭

表6-1 供試牛の履歴と体尺

Cow ID	948	951	Reference**
Parity	3	2	
Parturition	'97.7.2	'97.3.21	—
Daily milk yield [kg]	25.4	22.1	—
Body length [cm]	250	252	245
Hip height [cm]	145	139	146
Hip bone width [cm]	62	58	58
Distance between rump and hip bone[cm]	55	55	49.5
Distance between rump and fore teat [cm]	33	37	40
Distance between fore and hind legs[cm]	91	103	113
Inside width between hind legs [cm]	34	27	19
Abdomen height [cm]	57	64	57
Teat tip height [cm]	54	53	48.5
Distance between teats* [mm]			
1) DF	120	145	138
2) DR	50	85	87
3) DLS	119	156	104
4) DRS	117	150	104

Date : '98.12.6、13:00～15:00

\* DF = front, DR = rear, DLS = left side, DRS = right side, \*\* Chapter 3

間距離が狭くなる時期ではあったが、いずれの乳頭間距離も試作システムでのカップ装着適応範囲内であると判断した。

#### 6-4-1 ロボット機械系に対する牛の馴致

供試牛の試作ストールおよびロボット機械系への馴致は、同一作業員によって朝から夕方にかけて1日3回、6日間かけて以下の作業を段階的に実施した。

- ① 牛舎から実験舎内まで供試牛を誘導し、試作ストール後方から進入させて、ストール内で乾草と濃厚試料を給与し、採食させた。
- ② 供試牛をストール内において牛体位置追従機構で後軀を保持した状態として、バケットミルクを用いて人手で搾乳作業を行った(図6-4)。
- ③ 牛体位置検出・追従機構による保持状態で、ロボットを手動操作してロボットに装備した搾乳機を用いて人手でカップを装着し、搾乳を行った。
- ④ 牛を捕捉した状態でマガジンアームおよびマニピュレータの展開・退避動作を反復して、アクチュエータ等の発生音に対する馴致を図った。
- ⑤ 牛体位置検出・追従機構で牛を捕捉状態で各乳頭位置の教示作業を行った。

以上の過程において、両供試牛ともに馴致初期ではストールへの進入を拒否する場面があり、特に初日から3日目にかけて糞尿の排泄行為が幾度か観察されたが、4日目以降は円滑にストールに進入するとともにストール内あるいはその前後での排泄は無くなった。この排泄行為は、これまでの搾乳ロボットを用いた牛の馴致試験を行った過去の報告(STEFANOWSKAら, 1992; MARCHALら, 1994; 堂腰ら, 1996)にもあるように、馴致初期において牛が日常的なストールとは異なる

新奇環境から受けるストレスが起因していることが推察されたが、試作ストールへの進入経験に伴って次第に機械系に対する緊張が緩和されたものと考えられた。また、馴致初期には1回当たりの泌乳量の急激な低下もみられたが、徐々にそれまでの泌乳量に回復するとともに、四肢の踏み換えや挙げなどの行動も見られなくなった段階で、ロボット搾乳試験を実施した。乳頭位置教示作業は前述の方法により1頭当たり60~70sの時間で完了することができた。

乳頭のティーチング位置を格納するファイル形式例を表6-2に示す。表中のTeat No. (0・1・2・3)は、前述のように左後・右後・左前・右前乳頭であり、同時にカップ装着順序を意味する。

#### 6-4-2 ロボット搾乳試験

供試牛をストール内へ誘導し、リモコン操作により牛体位置追従機構を牛体にセットし、模擬的にディストリビュータのタップへの自動接続を行った。人手により乳頭清拭と前搾りを行った後に、試験を実施した。本来であれば、本システムではパイプラインへの接続を前提としているが、本試験では便宜上バケットミルク(2挙動方式)に接続し、設定真空度を48kPaと設定した。

##### 1) 牛体と乳頭の位置認識の適応性

図6-5に、供試牛のティーチング時とカップ装着時の乳頭位置について、坐骨端を基準とする作業座標系で示す。図には、牛体位置追従機構によって牛の後軀を捕捉してエンドエフェクタ上のローカルセンサで捉えた乳頭の位置をプロットし、併せて位置データの平均値を中心とするローカルセンサ検出領域を示した。これら位置データはマニピュレータの第1, 2および3関節軸の各回

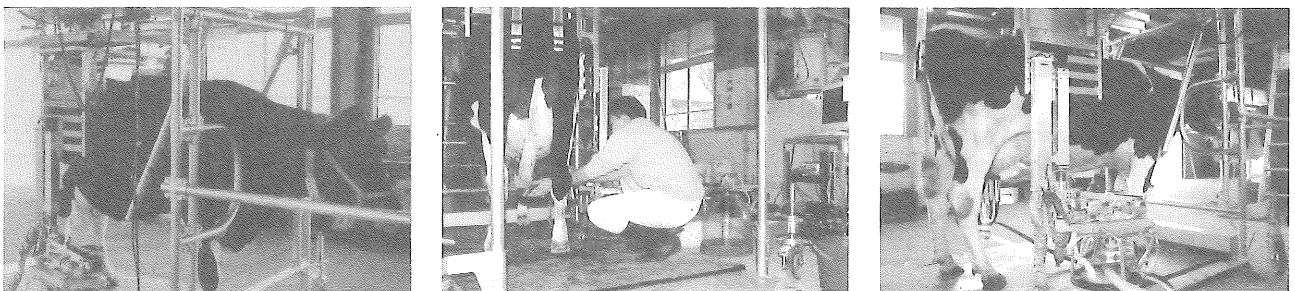


図6-4 ロボット機械系の牛への馴致(ストールへの進入とカップの人手装着)



表6-2 乳頭ティーチング位置格納ファイルTEAT.Dの表示例

Cow No.	Teat No.	Date	Time	XMT	YMT	ZMT
948	0	1997/12/01	9:17:55	473.01	177.14	-39.47
948	1	1997/12/01	9:18:15	475.18	262.01	-35.47
948	2	1997/12/01	9:18:35	381.94	145.31	-21.72
948	3	1997/12/01	9:19:01	379.25	287.52	-21.97
951	0	1997/12/01	9:35:35	414.76	117.84	-37.97
951	1	1997/12/01	9:35:55	425.72	211.86	-32.47
951	2	1997/12/01	9:36:27	276.76	71.47	-34.97
951	3	1997/12/01	9:37:09	292.31	255.90	-39.47
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.

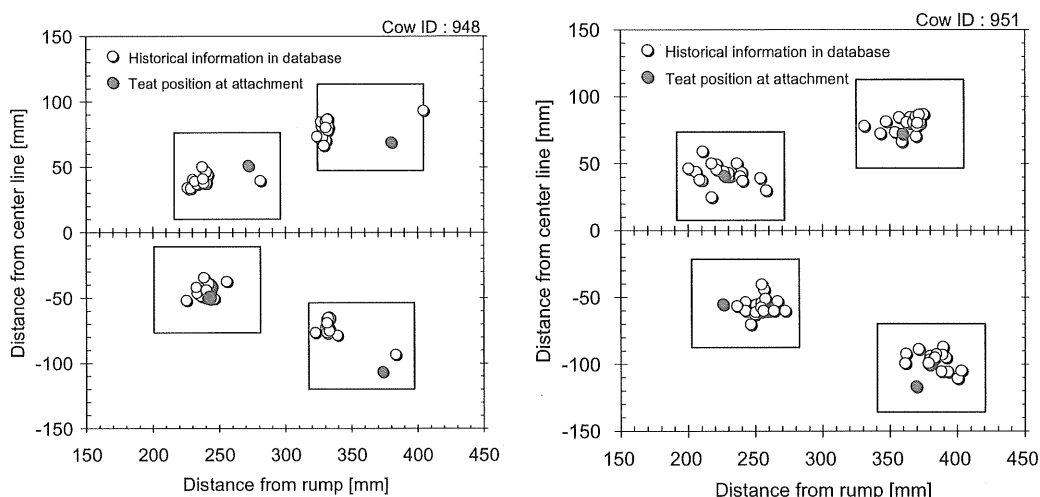


図6-5 データベース履歴、カップ装着時乳頭位置およびセンサ検出領域

転角から算出した。

乳頭の位置偏差は、泌乳牛の生理的反応による乳房の膨張や搾乳前の横臥による乳房形態の一時的変形等に起因する (ALLENら, 1992; 八谷ら, 2000)。さらに、牛体位置追従機構による牛体の保持状態にも大きく影響を受けるものと思われる。図に明らかなように、ティーチングデータとの位置ずれが大きく生じた場合には幾度かの乳頭探索作業を要すると考えられるが、実際の乳頭位置はセンサ領域の中に十分に包含されているのが分かる。

牛体位置追従機構による牛体捕捉のみでは乳頭位置の確定は困難ではあるが、腰角や臀部と相対的な位置関係にある乳頭に対して、接近するための概略位置情報としては満足できる。ローカルセンサは、牛体位置追従機構による位置誤差を含めてカップを乳頭に合致させる機能

を有する。すなわち、牛体位置追従機構による乳頭概略位置の認識とローカルセンサによる乳頭の局所的な位置精査、これら双方の機能によって一定の位置再現性を得ることができ、所要の目的を達成することができたと判断した。

第4章で示したように、センサ領域は80×66mmであることから、一度の乳頭探索試行で乳頭を検出するにはX方向では40mm、Y方向では33mmまでの位置誤差を許容する。センサの寸法がより大きいと隣接する乳頭も同時に包囲してしまう等、乳頭探索動作に支障を来すことが想定される。ロボットは、構築したデータベースの個体ごとの乳頭位置データに基づいて、カップ中心を目標点である乳頭位置まで誘導する。ティーチングと搾乳の時間帯がずれるほど、また泌乳ステージの経過に伴って位置偏差は大きくなり、ロボットの装着試行回数

が増加する可能性が考えられる(第2章参照)。こうしたことから、今後は、中・長期にわたって異なる時間帯や泌乳ステージにおける動作性を検証する必要がある。前述したように、時間経過に伴う乳頭位置の変動特性をロボット制御の乳頭探索アルゴリズムに導入することの必要性を追認した。

## 2) ティートカップのマニピュレーション

図6-6はカップ装着動作の時間経過を、図6-7には自動搾乳ユニットの一連の動作を示す。初期位置から乳房下方へのマガジンアームの展開、マニピュレータ展開・装着・退避までの一連の動作には92~127sを要した。このうち、実質的なロボット装着動作(マニピュレータ

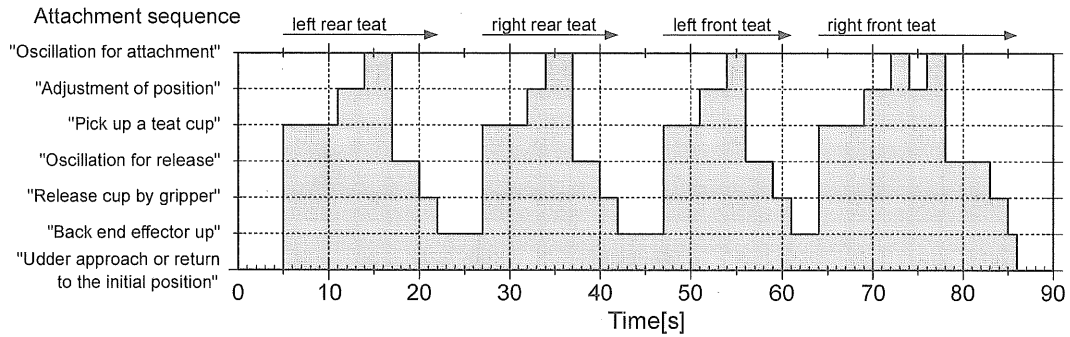


図6-6 ロボットによるティートカップ装着シーケンス

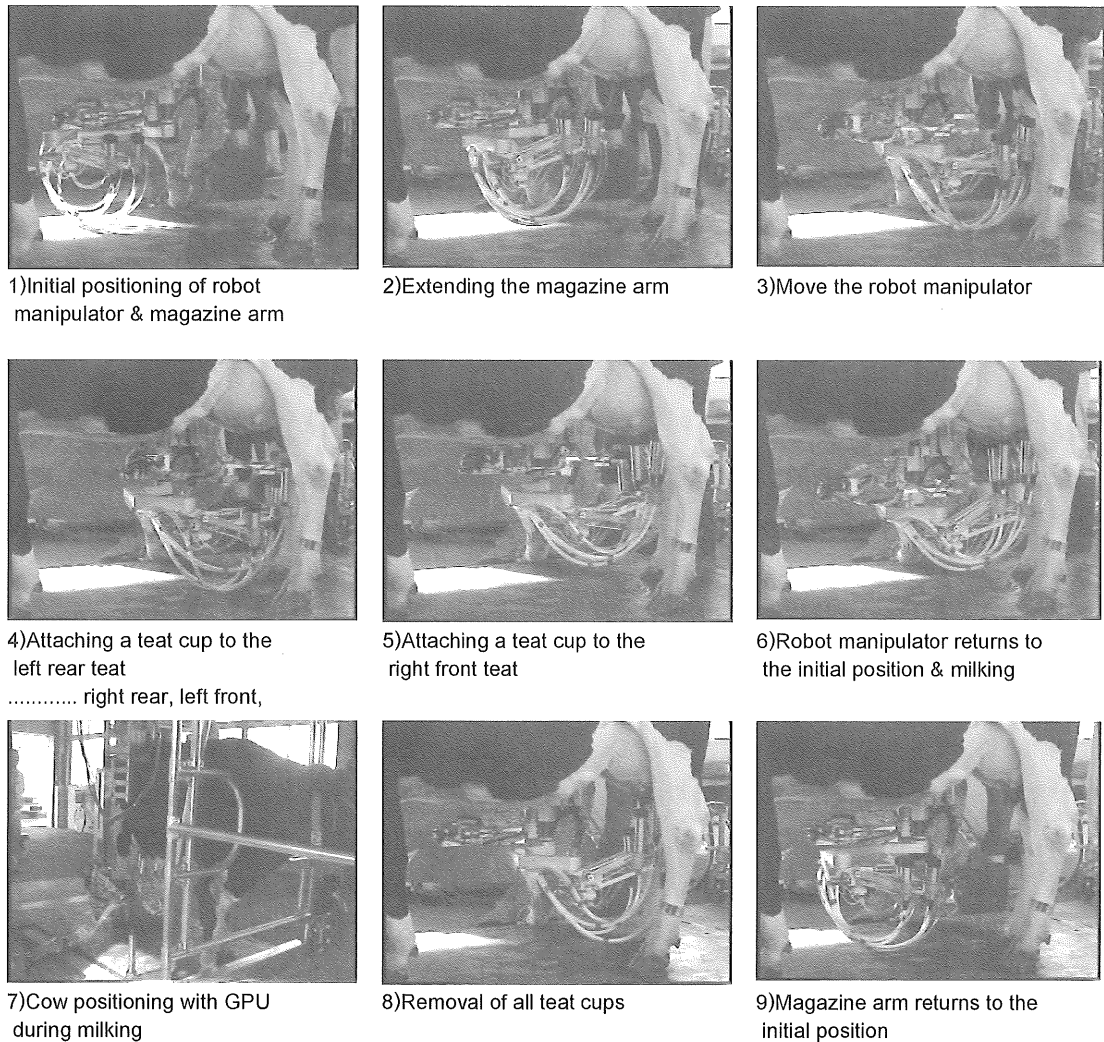


図6-7 ロボット装着・搾乳の過程

の展開～退避)は60s程度であり、乳頭1本当たり1～2回の試行回数で $16.3 \pm 3.5s$ で装着を完了し、当初目標を達成することができた。装着時、呼吸に伴う乳頭の動きによっては大きな位置ずれが生じて再度乳頭探索・装着試行する場面がみられた。この装着所要時間は、これまでの幾つかの搾乳ロボットシステム (ARTMANN, 1992; STREETら, 1992; ROSSING, 1997) と比較して同等以上であり、全搾乳プロセスにおいて許容できる性能といえる (STREETら, 1992)。

マニピュレータの各アーム展開動作では、四肢への衝突を十分に回避し、マガジンの各ホルダからのカップの取り出しやミルクチューブの絡みも無く、円滑で速やかな装着作業を達成した。特に、エンドエフェクタは牛体軸に対して常に平行姿勢を維持したことによって、狭隘な後肢空間に安全に進入することができた。また、装着したカップは4本の乳頭に対して振れることなく真直ぐに取り付けられたことから、搾乳中に乳頭基部を捻るような現象も観察されなかった。これらの観察結果から、ロボットの機械的諸元の設計およびエンドエフェクタの軌道生成の妥当性が確認された。

牛体位置追従機構は、牛体の大きな動きに対しても円滑に追従し、牛体とロボット機械系のXY平面上の相対位置関係を概ね確保したことから、搾乳途中で装着済みのカップが脱落するなどの現象はなかった。なお、カップが乳頭から脱落した場合、一度に多量の空気がミルクラインに侵入し、結果として乳頭先端部の真空度が大きく変動する危険を有する。こうした点からも、本機構の追従性を評価できると考える。

搾乳終了は、分房別のミルクチューブ内の乳汁流出状態を目視で観察して、カップ離脱のタイミングを決定した。制御用計算機へのキー入力指示により、ラインへの真空を完全に遮断するとともに、カップ内に強制的に0.5MPaの圧縮空気を3.0s間送入了。

すべてのカップは、キー入力指示後約3～5sでほぼ一斉に離脱して直下で待機する各カップホルダに落下して収納されるとともに、マガジンアームが初期位置に退避して原点復帰した。以上で、一通りのロボット搾乳動作が終了した。なお、圧縮空気送入によるカップ離脱機能は供試牛を驚愕させることなく、牛に対してストレスを及ぼす機械動作ではないと判断した。しかし、この方法

では乳頭の太さなどに起因して完全に離脱できない可能性は払拭できず、確実性を高めるためには、別な方法を含めて更なる改良を要すると考えられた。

### 3) 装着時のティートカップ内圧力応答

カップ装着時のミルクラインとティートカップ拍動室内の圧力応答の例を図6-8に示す。試験時の拍動数は50pulse/min, 拍動比(吸引:マッサージの比率)は56:44と一般的な設定であった。

圧力センサは、約160cmのショートミルクチューブとミルクローの間にT字管路を介して取り付けられた。圧力センサのデータは、ロボット制御用計算機とは別の計算機を用いて、サンプリングタイムを0.25msとしてA/D変換器を介して収録された。図では、2.2s時点でカップ内の真空が解除されている。乳頭は、瞬間的にライナーの中に滑り込み、カップ孔を閉塞したことによってカップ内負圧降下は20kPa程度に留まり、この間の所要時間は約0.15sであった。真空圧適用時点で、乳頭端とマウスピース間の鉛直距離が近接していたとみられ、吸引作用によりカップがグリッパから浮上して乳頭が挿入される現象が、収録ビデオ画像からも確認することができた。この例から分かるように、バルブ開の真空適用からカップ装着までの空気流入量をほぼ最小限に留めることができたと考える。前述したように、空気流入が多量に生じた場合は乳頭先端部の真空度に変動を起こし搾乳のリズムが乱れ、乳房炎の原因としても指摘される。ロボット搾乳に伴うカップへの大気流入量に起因して遊離脂肪酸量が増加するという報告 (BJERRINGら, 2002) もあり、不用意な空気流入は最小限に留める必

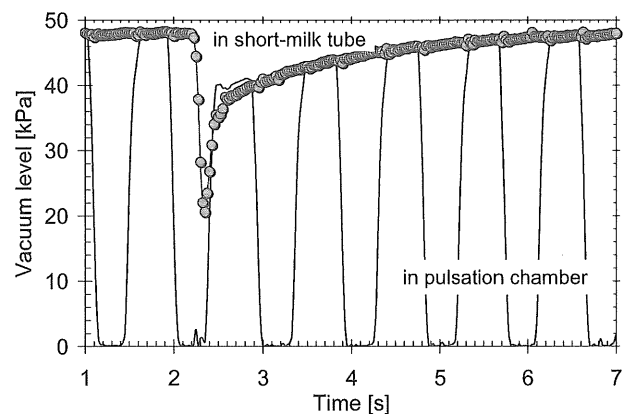


図6-8 カップ装着時の負圧応答例

要がある。SCHILLINGMANNら(1993)が指摘するように、乳頭自体が弾性体であるためにカップへの真空圧の空気流で生じる吸引力によって、乳頭がカップ孔内に引き寄せられる現象である。これは、ゴムを材質とするマウスピースそのものが弾性構造体であること、さらに乳頭自体が適当なコンプライアンスを持っていること、こうした相互の構造と機能の補完的作用によってXY平面内のみならずZ軸方向においても、多少の位置的誤差を吸収して挿入が可能になると解釈できる。なお、KLOMPら(1990)は、真空圧適用を伴うロボットのXY平面内位置決め許容誤差は5mmまでとしている。

図では、ライン内の残圧の影響で運転真空度48kPaに復帰するまでに4.0s程度の時間を要したが、前出の(8)式からカップ装着成功と判断したのは34kPaを通過する2.4s時点と推察される。装着時の負圧応答は、設定真空度や乳頭端とマウスピース間の鉛直相対距離に依存し、装着後においては乳頭の挿入程度やカップ内への空気流入量に左右されると考えられる。

## 6-5 最終考察と将来展望

繋ぎ飼い牛舎用の搾乳ロボットシステムに限らず、ティートカップの自動装着に際しては牛の姿勢や四肢を強制的に制御する考え方は現実的ではない。可能な限り牛の動きに沿った受動的な対応を機械システムに反映させることが重要であり、さらに乳頭位置検出とティートカップ装着動作は実時間で処理すべき問題である。

本研究では、牛体構造および乳頭配置などに基づくロボットマニピュレータ設計パラメータ(基本機構)を提案し、与えられた作業空間全体で可操作度を指標としてその運動学的評価を行った。その結果高い運動学的特性を確認するとともに、繋ぎ飼用ロボットとして牛側に考慮すべき事項を踏まえて機械システム全体を設計開発した。本システムは、レールに懸架した牛体位置追従機構によって牛体後躯すなわち坐骨端と腰角部を物理的に捕捉して、この機構に自動搾乳ユニットを装備することによってロボット座標系と作業座標系を同一にした上で、乳頭の動きに実時間で保持・追従してカップを装着する位置制御系を構築した。本研究は、こうした"繋ぎ飼い"への適用を前提とした独自のシステム設計・開発を進め、最終的に搾乳牛に対する適応性を検証した結果、"カッ

プの自動装着"という搾乳ロボットとして必要最小限のタスクを達成した。本システムは、繋ぎ飼いで搾乳作業の超省力化機器の基本形という位置付けで考えることができるが、これをプラットフォームとして従来管理作業者の観察と働に頼った管理から、個体識別と牛体情報データに基づく精密飼養管理への移行を視野に入れておくべきと考える。

以下に、本システムの問題点と更なる検討・改良を要する主たる技術について今後の展望を総括する。

- 1) 牛は絶えず動いており、腹部下方で動作するロボット機械系は後肢の挙げ降しや蹴りによる破損の危険性を常に抱える。本システムでは、マニピュレータ各関節の駆動系には位置決め精度や制御系の容易性からACサーボモータを採用した。しかし、この電動アクチュエータはシステムの耐環境性や機構の柔軟性、安全性という機能の観点からは望ましいものではない。こうした作業環境および対牛親和性を高める上で、空気圧アクチュエータを用いた位置サーボ機構は、今後の開発改良の対象として検討に値する。アクチュエータ自身の低剛性特性(高岩, 2001)のために、牛が放つ外力に対してピストンは容易に変位し、サーボ系自体が一種の弾性体として期待できる。すなわち、これらの特徴を活用することで電動式や油圧式では実現できない空気圧ならではのメリットを享受することが可能となる。こうした機械システムの完成度を確立した上で、次項以降の周辺要素技術を付与する方策を検討する必要がある。
- 2) 装着前の乳房清拭や前搾りおよび分房別のカップ離脱機構等、要素作業のシステムへの導入は不可欠である。特に繋ぎ飼いを前提とするからには、可能な限り他の搾乳ロボットシステムにあるような、洗浄水によって牛床を濡らす方法とすべきではない。また、乳房および乳頭全体を洗浄した後でカップを装着して拍動による刺激を与えた場合に、搾乳中のオキシトシンレベルが最も高くなる方法(MACHUHOVAら, 2000)にみられるように、牛の泌乳生理を考慮した刺激効果を付与して乳汁排出反射を促進する機能の導入は今後検討する価値がある。
- 3) 乳牛の泌乳生理特性は泌乳量が増加しても変わらないため、牛個体の泌乳能力に見合った搾乳制御が望ま

しい (DAVISら, 2000)。牛の自発的行動に依らない本システムにおいては、乳牛個体ごとの終日固定搾乳間隔を基本とすることで、個体の泌乳特性を考慮しつつ機械的な搾乳処理能力を高めることが期待される。そのためには、泌乳ステージや泌乳量に見合う適正な搾乳時間間隔 (回数) を解明するとともに、各分房の搾乳特性に応じた搾乳プロセス (HONDAら, 1998) についても研究を深化し、ロボットシステムに付与・高機能化を図ることも求められる。

4) 現場への導入を考える際、機械としての作業能率を推定する必要がある。

搾乳ロボットにおいては、乳頭探索や装着の試行回数が作業能率に大きく影響する要因ではあるが、本システムでは(1)パイプラインとのタップ切り離し・ストール間移動・タップ接続：60s, (2)乳頭清拭：40s, (3)カップ装着：60s, (4)乳頭消毒：20s程度と想定する。前搾り・搾乳を4~6minとすれば、ユニットタイムは7~9minであり、1ユニットの搾乳能率は6.7~8.6頭/hと推定できる。これは放し飼い用ロボットシステム (ストール当たり6.3~8.3頭/h) (畜産技術協会, 2000; KONING, 2002) に比較して遜色ない数値であるが、本システムを対尻式牛舎 (図4-1参照) への適用とした場合には、左右のストール列に各々1ユニットを配置することが望ましい。

5) 繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムはこれをプラット

フォームとして、搾乳技術を改善するとともに繋ぎ飼いならではの精緻な個体管理を実現する可能性を十分に有する (図6-9)。牛乳生産における安全性向上に向けては、乳房炎に関連した乳質の低下を検出するセンシングは極めて重要である。乳量・乳温・乳汁電気伝導度の三つのパラメータに基づく継続的解析モデルでは、乳房炎感染の検出に優れているが (MOLら, 2000), 体細胞数の感知には近赤外分光法が有望視される (TSENKOVA, 2000)。また, MÖTTRAMら (2000) はNAGガーズ濃度上昇に基づくバイオセンサを開発しており、さらに有用な指標検出法が見出される可能性もある。こうした乳質モニタリングシステムをプラットフォームとしてのロボット機構に統合化させる必要がある。これら搾乳システム全体の高度化が、今後の"精密酪農"の一つの形態として提案されるべきである。

繋ぎ飼いにおける搾乳ロボット化技術は、わが国酪農業の大要である飼養形態を大きく改変することなく超省力的な搾乳作業を実現し、さらにここで得られた個体ごとの乳量・成分の把握に基づき、個体別混合飼料給飼装置との併用により適正かつ効率的な飼料設計・給与を可能とする。また、飼養管理全体を通じたシステムで新しい技術を捉える場合に、人間の作業性ならびにその技術が動物にどのような影響を及ぼすかを把握する必要がある

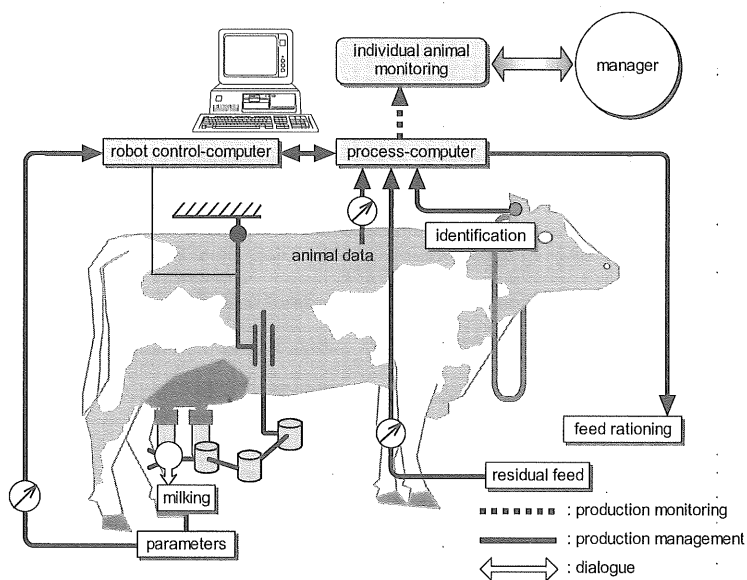


図6-9 精密繋ぎ飼い酪農における生産管理とモニタリングシステム概念

る。従前の拘束作業からの開放にともない、給飼量の定期的な調整や採食状況・コンディションのチェックなどの管理面を重視し、こうした繋ぎ飼いで独自のシステム化によって少数精鋭牛群の中での利益率の向上を図っていくのが、今後の繋ぎ飼いにしかできない精密管理であり、またこれを目指す方向が努力目標になると思われる。

## 6-6 摘要

繋ぎ飼いで牛舎への適用を前提とするロボット搾乳技術の開発を目的として、平面3自由度のマニピュレータが有する冗長性を利用して、ティートカップ装着手法の構築を試みた。また、試作システム全体の動作性と適応性を検証するために、2頭の経産牛を供試した。乳頭位置の教示とシステムへの馴致を経て実搾乳試験を実施し、以下の結果を得ることができた。

- 1) 経時的な乳房拡張およびその他諸条件による乳頭位置の変動に対応して、ローカルセンサによる乳頭探索を段階制御方式とした。続くティートカップ装着過程において、マニピュレータの持つ自由度を利用して、エンドエフェクタにXY面上でリサージュ波形運動を与えながら真空を適用させることによって、乳頭のカップ孔への挿入を促進する動作アルゴリズムを提案した。
- 2) 4乳頭へのティートカップ装着時間は約60sで完了した。牛体位置追従機構による牛体保持とティーチングデータに基づく位置推定により、概略位置の再現性を得た。これを踏まえたローカルセンサによる位置精査、マニピュレータの経路生成や乳頭への追従性およびカップ装着性能等、システムとしての適応性が確認され、繋ぎ飼いで用いる搾乳ロボットの技術として有用であることを確認した。
- 3) ティートカップ内の負圧応答結果から、装着時にはカップ内への過剰な空気流入を回避できることが明らかとなった。装着後のミルクライン内の真空圧変動を最小限に抑止し、適正な搾乳システムを達成した。
- 4) 今後の課題として、ロボット機構に柔軟性と耐環境性をもたせることを目的にマニピュレータへの空気圧サーボの導入、乳頭清拭や前搾りおよび分房別のカップ離脱、個別搾乳制御手法、さらにバイオセンサを

含む乳質モニタリングなど要素技術の導入の検討が残されている。本搾乳ロボットシステムは、繋ぎ飼いでにおいても放し飼いで用いるロボットと同様に搾乳システムの高度化に向けたプラットフォームとして期待できる。

また、本研究での搾乳作業のロボット化は、個別混合飼料給与装置など給飼管理システムとの統合化を図ることによって、繋ぎ飼いでしかできない知識集約的精密管理を志向した今後の飼養管理技術目標に寄与するものと思われる。

## 第7章 総括

本研究は、繋ぎ飼いを前提とした搾乳ロボットシステムの設計開発に関する検討を行ったものである。本研究で得られた具体的な成果は以下のとおりである。

### 7-1 搾乳ロボット研究の現状、背景、目的と構成要素(第1章要旨)

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一方で、収益性向上に向けて大規模な飼養者層における規模拡大が進んでいる。酪農の多様化の維持を考えた場合、特に50頭規模の基幹酪農家層の減少にいかに関与をかけるかが、日本酪農の今後の大きな課題である。本研究は、日本の基幹酪農家の飼養方式である繋ぎ飼いで「搾乳の完全無人化」を目的として、主たる技術目標を「ティートカップの自動装着」の達成においた。

本研究に関連する既往研究を概観すると、特にオランダを始めとする欧州では、国家プロジェクトとして'85年頃から群飼養を前提とする搾乳ロボットシステムの開発研究が開始されている。しかし、ロボット技術の開発に際して繋ぎ飼いと群飼養という飼養管理方式に起因して、牛にとっての搾乳の場が牛固有の生活空間であるか一時的な空間であるかの違いが大きく、それによってロボットシステムに求められる設計概念は異なる。そこで、本研究では繋ぎ飼いのストール内において牛の自由な動きに逆らうことなく、ティートカップ装着を実現するための作業移動型ロボットとして、

- 1) 牛体構造と乳頭位置の生理学的変動を考慮した機械設計条件の明示、
- 2) 作業の基準となる座標の中でロボットの位置を確定

する機能と自律化のため、乳頭位置を精査する外界センサ技術の確立、

3) 乳頭への良好な追従性に向けた機械系の小型軽量化と制御の実時間性の確保、  
を研究の主たるねらいとした。

## 7-2 ホルスタイン種泌乳牛の乳頭配置とその経時的変動 (第2章要旨)

第2章では、繋ぎ飼い牛舎への適用を前提とした搾乳ロボットシステムの設計評価に資することを目的として、産次と泌乳ステージに対する乳頭間距離の変動および搾乳後の時間経過に伴う日内変動について測定評価した。

泌乳期を通じて搾乳前の乳頭間距離を測定した結果、初産牛における泌乳ステージの進行に伴う後乳頭間距離の減少と経産牛の広い前乳頭間距離に配慮したロボット機械系を主としたシステムを設計する必要性を認めた。なお、左右の乳頭間距離の不均衡はある程度認められるものの、機械系の機構次第では大きな問題とはならないと推察された。搾乳後の乳頭間距離の日内変動を測定した結果、泌乳後期においては特に搾乳回数や搾乳間隔の設定に配慮し、ロボット制御システムの設計に反映させることによって自動装着成功の機会を増加させるなどのシステムの信頼性を高めることができるものと考えられた。特に、乳頭探索領域に対する一定の制限を設定することによって肢や対象外の乳頭を検出する機会を低減することができるかと推察された。

## 7-3 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 (第3章要旨)

第3章では、ロボット機械系設計指標としてホルスタイン種泌乳牛111頭を供試して体尺測定結果に基づいて、ロボット作業域を提示した上で求められるロボットの自由度構成、リンク長およ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、動作可能な空間領域をモデル的に示した。これを考慮した機械系、特にロボットマニピュレータの関節構成と軌道生成を提案した。マニピュレータの標準作業域は、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

画を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、第1、第2および第3アームリンク長をそれぞれ400mm、350mmおよび200mmと設定した。

## 7-4 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 (第4章要旨)

第4章では、前章で提示した設計指標に基づいて開発したロボット機械系の構成要素とシステム全体のタスクを示した。牛体の臀部および左右の腰角を保持し、一体化して牛体の動きに追従する機構（牛体位置検出追従機構）を基軸として、本機構の右側に自動搾乳ユニットを連結した。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個の回転関節を有するACサーボモータ駆動による多自由度ロボットマニピュレータ、およびこれらの鉛直高さを調整する昇降軸から構成される。ティートカップ把握用エンドエフェクタ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。

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誘導された後に、乳頭位置センサで精査する。センサ領域内に包囲した個別乳頭位置は各光軸のon-off情報をもとにリアルタイムで認識され、制御周期を20msとする位置制御により、カップ装着動作を行うものとした。

## 7-5 乳頭追従制御系とマニピュレータの操作能力 (第5章要旨)

第5章では、前章で構築した平面3関節型ロボットマニピュレータについて、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、位置制御時の第1、2および3関節の固有周波数の実測値は各々3.5Hz、4.5Hzおよび4.5Hzであった。この値に基づきゲインレートを5として、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、サンプリング時間を20msと決定した。乳頭挙動に関する過去の調査結果から、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。XY平面におけるマニピュレータの運動学においては、エンドエフェクタを牛体軸に対

して平行姿勢を維持する条件とすることにより、逆運動学問題は本質的に2自由度機構と同様となることを解析的に示した。これを踏まえて、マニピュレータの操作能力を検討した結果、0.8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。

## 7-6 ティートカップ装着アルゴリズムとシステムとしての適応性(第6章要旨)

第6章では、最終的なシステム構築としてマニピュレータのZ軸方向における引導制御、すなわちティートカップの装着・解放アルゴリズムを提示した。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エンドエフェクタに与えながら上昇させ、その過程で真空を適用する方式とした。

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。牛体位置追従機構は、牛体と相対的な位置関係にある乳頭に接近するための位置情報としてはほぼ十分であった。また、そこで生じた位置偏差に対して、ローカルセンサはカップ中心を乳頭端位置に合致させる機能を果たした。牛体位置追従機構により受動的に牛体を捕捉し、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、60s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最小限に抑止することができた。

これらの試験結果より、ティートカップ装着時及び搾乳中における牛体の動きに対しては牛体位置検出追従機構による牛体追従性が十分機能することなど基本的な適応性を確認することができた。併せて、幾つかの設計上の問題あるいは今後の開発すべき要素技術を明らかにした。

## 参考文献

### 第1章

1) ARENDZEN, I & A.T.J. SCHEPPINGEN : Economical sensitivity of four main parameters defining the room for investment of automatic milking system on dairy farms, Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, Lelystad, The Netherlands, 201-211, 2000.

- 2) 畜産技術協会編：自動搾乳システム実用化推進事業平成11年度報告書(自動搾乳システム事例情報第2集), 畜産技術協会, 93-98, 2000.
- 3) 中央酪農会議：平成11年度酪農全国基礎調査, 2000.
- 4) GOUWS, J. : The systematic development of a machine vision based milking robot, A thesis for a degree in Wageningen Univ., 1992.
- 5) DAVIS, M.A., D.J. REINEMANN & E. MALTZ : The significance of individual teat morphology and Physiology on milking performance: possibilities offered by automatic milking, Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking, Toronto, Canada, 97-99, 2002.
- 6) 福森 功：欧州における搾乳ロボット開発動向調査報告(生研報告No.30), 生研機構, 1-80, 1993.
- 7) 八谷 満：欧州における搾乳ロボット開発技術の状況, 日本家畜管理研究会誌, 30(3), 95-102, 1995.
- 8) 八谷 満・古山隆司・福森 功・市戸万丈・桑名隆・小林 恭・窪田哲夫・加茂幹夫：作業者の生体機能面からみた搾乳ユニット搬送システムの導入効果, 畜産の研究, 養賢堂, 49(8), 363-366, 1995.
- 9) 八谷 満・森田 茂・Tzenkova Roumiana・天羽弘一・喜田環樹・堂腰 頭：国際シンポジウム"Robotic Milking"報告, 日本家畜管理学会誌, 36(4), 157-162, 2001.
- 10) HARSH, S.B., R.B.M. HUIRNE, A.A. DIJKHUIZEN & R.W. GARDNER : Short and long term economic aspects of automatic milking system, Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ.No.65, Wageningen, The Netherlands, 421-431, 1992.
- 11) HOGWERF, P.H., P.J.M. HUIJSMANS, A.H. IPEMA, T. JANSSEN & W. ROSSING : Observations of milking teat cup attachment in an automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 80-92, 1992.



- 12) HURNIK, J.F. & L.E. JOHNSON : Udder conformation as it relates to the successful attachment of the milk cluster by a robotic milker, Dairy Res. Report, 85-90, 1997.
- 13) 石井 明, 金子 透, 片山 淳, 望月研二 : アーク溶接ロボット用視覚センサ, 日本ロボット学会誌, 16 (1), 96-101, 1998.
- 14) KASHIWAMURA, F. : Development and current state of the milking robot in Japan and Europe, Anim. Sci. J., 71(5), 445-453, 2000.
- 15) KELTON, D.F., D. LAZENBY, D., K.J. HAND, K.J. & E. BOHLSSEN : Challenges on incorporating data from robotic milking systems into official milk recording programs, Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking, 1-20-28, Toronto, Canada, 2002.
- 16) KONDO, M., S. TACHIKI, M. ISHIDA & K. HIGUCHI : Automatic measuring system for body fit on the automobile assembly line, IEEE International conference on robotics and automation, 538-543, 1995.
- 17) KONING, K, Y. VORST & A. MEIJERING : Automatic milking experience and development in Europe, Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking, 1-1-11, Toronto, Canada, 2002.
- 18) LIND, O., A.H. IPEMA, K. KONING, T.T.MOTTRAM & H.J. HERMANN : Automatic milking: reality, challenges and opportunities, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, Lelystad, The Netherlands, 19-31, 2000.
- 19) LINDE, R. & J. LUBBERINK : Robotic milking system (RMS)—design and performance, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 55-62, 1992.
- 20) MILLER, R.H., L.A. FULTON, B. ERETZ, W.F. WILLIAMS & R.E. PEARSON : Variation in distances among teats of Holstein Cows: Implications for Automated Milking, J.Dairy Sci., 7(7), 1456-1462, 1995.
- 21) MOTTRAM, T.T. : Design principles for automatic milking system, Agricultural Engineer, 39-42, 1991.
- 22) MOTTRAM, T.T. : Passive methods of modifying cow posture for automated and robotic milking systems, J. Agric. Engng. Res., 52, 285-293, 1992.
- 23) 野附 巖 : 全自動搾乳機の開発, 搾乳作業の省力化に関する研究 (研究成果114), 農林水産技術会議事務局, 137-182, 1979.
- 24) 野附 巖, 市川忠雄 : ドイツ, イギリスおよびオランダにおけるフリーストール・ミルクパラーシステムの実態 (平成5年度海外調査報告書), 畜産技術協会, 75-79, 1993.
- 25) 野附 巖 : 搾乳ロボット総論, 平成12年度専門技術員研修「搾乳ロボットを基軸とした乳牛の省力飼養管理技術」, 農林水産省草地試験場・農産園芸局, 1-13, 2000.
- 26) 農林水産省 : 新たな酪農・乳業対策大綱, <http://www.lin.lin.go.jp/maff/frame01.html>, 1999.
- 27) 農林水産省 : 畜産の動向, <http://www.lin.lin.go.jp/maff/frame02.html>, 2002.
- 28) 農林水産省統計情報部 : 平成13年牛乳生産費, <http://www.maff.go.jp/toukei/sokuhou/keiei/keiei.html>, 2002.
- 29) 岡本嗣男・藤浦建史・白井良明・近藤 直 : 生物にやさしい知能ロボット工学, 1-4, 実教出版, 1992.
- 30) ORDOLFF, D. : Investigations on a system for automatic teat cup attaching, Proc. of Int. Symp. on Automation in Dairying, Wageningen, The Netherlands, 287-290, 1983.
- 31) PIRKELMANN, H. : Feeding strategies and automatic milking, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 289-295, 1992.

- 32) REINEMANN, D.J. : Evolution of automated milking in the USA, Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking, 1-15-19, Toronto, Canada, 2002.
- 33) ROBERTSON, V. : ALFA LAVAL Invest in Silsoe's robot technology, 36-37, Dairy Farming, August, 1994.
- 34) RODENBURG, J., D.F. KELTON & K. HAND : Canadian experience with automatic milking systems, Proc. of 52nd Annual Meeting of the European Association of Animal Production, Budapest, Hungary, 2001.
- 35) ROSSING, W. & A.H. IPEMA : Stand der technischen Entwicklung zur Automatisierung des Milchentzuges, Landbauforschung Volkenrode, Germany, Sonderheft 93, 197-206, 1988.
- 36) 澤山一博・高橋裕之・三戸正道・森田 穰・松村信良・笹島克巳・玉木哲夫・稲野一郎・島田実幸・高橋圭二 : 搾乳ロボットの開発に関する研究, 北海道立工業試験場報告, 289, 89-100, 1990
- 37) SCHON, H., R. ARTMANN & H. WORSTORFF : The automation of milking as a key issue in future oriented dairy farming, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 7-22, 1992.
- 38) 生研機構編 : 研究会「搾乳ロボットの開発」, 生研機構, 1-73, 1992.
- 39) 生研機構編 : 搾乳の自動化に関する調査資料 I, 生研機構・農業機械化研究所, 1-132, 1995.
- 40) 生研機構編 : 搾乳の自動化に関する調査資料 II, 生研機構 農業機械化研究所, 1-124, 1996.
- 41) SILSOE RESEARCH INSTITUTE : robotics and automation group: Voluntary milking system, <http://www.sri.bbsrc.ac.uk/>, 2002.
- 42) 新出陽三・松田従三 : 搾乳ロボットと酪農, pp96, 酪農総合研究所, 1994.
- 43) STREET, M.J., R.C. HALL, D.S. SPENCER, A.L. WILKIN, T.T. MOTTRAM & C.J. ALLEN : Design features of the Silsoe automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 40-48, 1992.
- 第2章
- 1) ALLEN, C.J., T.T. MOTTRAM, A.R. FROST, M.J. STREET, R.C. HALL & D.S. SPENCER : Field trails of the Silsoe automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 72-79, 1992.
- 2) ARENDZEN, I & A.T.J. van SCHEPPINGEN : Economical sensitivity of four main parameters defining the room for investment of automatic milking systems on dairy farms, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, Lelystad, The Netherlands, 201-211, 2000.
- 3) ARTMANN, R. : Status, results and further development of an automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 23-32, 1992.
- 4) ARTMANN, R. : Sensor systems for milking robots, Computers and Electronics in Agriculture, 17 : 19-40, 1997.
- 5) BOTTEMA, J. : Automatic milking-reality, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 63-71, 1992.
- 6) DUCK, M. : Evolution of Duvelsdorf milking

- robot, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 49-54, 1992.
- 7) 八谷 満：欧州における搾乳ロボット開発技術の近況, 日本家畜管理研究会誌, 30(3), 95-102, 1995.
- 8) HOGWERF, P.H., P.J. M.HUIJSMANS, A.H. Ipema & W. Rossing : Observation of automatic teat cup attachment in an automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 80-90, 1992.
- 9) HOGWERF, P.H. & A.H. IPEMA : Analysis of differences in yield and milk flow properties between front and rear quarters, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, Lelystad, The Netherlands, 60-61, 2000.
- 10) HURNIK, J.F. & L.E. JOHNSON : Udder conformation as it relates to the successful attachment of the milk cluster by a robotic milker, Dairy Res. Report, 85-90, 1997.
- 11) 喜田環樹・市戸万丈・松尾守展：搾乳ロボット高度利用化の基礎研究（第2報）, 日本家畜管理学会誌, 37(1), 42-43, 2001.
- 12) KNIGHT, C.H., J.E. HILLERTON, M.A. KERR, R.M. TEVERSON, A. Turvey & C.J. Wilde : Separate and additive stimulation of bovine milk yield by the local and systemic galactopoietic stimuli of frequent milking and growth hormone, J. Dairy Res., 59 : 243-252, 1992.
- 13) 小宮道士・川上克己・森田 茂：搾乳ロボットデータを利用した乳頭位置の変動解析, 農業機械学会北海道支部第52回講演要旨, 54-55, 2001.
- 14) LINDE, R. & J. LUBBELINK : Robotic milking system (RMS)-design and performance, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 55-62, 1992.
- 15) MARCHAL, P., G. RAULT, C. COLLEWET & L. WALLIAN : Mains Project-Automatic milking, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 33-39, 1992.
- 16) MILLER, R.H., L.A.FULTON, B.ERETZ, W.F.WILLIAMS & R.E.PEARSON : Variation in distances among teats of Holstein cows—Implications for automated milking, J.Dairy Sci., 78 : 1456-1462, 1995.
- 17) MOTTRAM, T.T. : Passive methods of modifying cow posture for automated and robotic milking systems, J.Agric. Engng. Res., 52 (4) : 285-293, 1992.
- 18) ROSSING, W & O.H. HOGWERF : State of the art of automatic milking system, Computers & Electronics in Agriculture, 17 : 1-17, 1992.
- 19) 鈴木省三・菊田 稔・百瀬利正・三浦祐輔：乳牛の乳器の大きさとその変化について, 日本畜産学会誌, 30 : 260-263, 1959.
- 20) 新出陽三：泌乳生理と搾乳, 新編酪農ハンドブック（廣瀬可恒・鈴木省三編著）, 養賢堂, 483-529, 1990.
- 21) STREET, M.J., R.C. HALL, D.S. SPENCER, A.L. WILKIN, T.T. MOTTRAM & C.J. ALLEN : Design features of the Silsoe automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospect for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 40-48, 1992.
- 22) 吉田 実・阿部猛夫：畜産における統計的方法, 43-60, 中央畜産会, 1982.

### 第3章

- 1) ARTMANN, R. : Sensor systems for milking

- robots, Computers and Electronics in Agriculture, 17 : 19-40, 1997.
- 2) HURNIK, J.F. : Ethology and technology: the role of ethology in automation of animal production process, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking, EAAP publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 401-408, 1992.
- 3) HURNIK, J.F. & L.E. JOHNSON : Udder conformation as it relates to the successful attachment of the milk cluster by a robotic milker, Dairy Research Report, 85-90, 1997.
- 4) 人類学講座編集委員会編, 人類学講座8 (成長), 75-81, 雄山閣出版, 1980.
- 5) KLOMP, C., W. JONGKIND, G. HONDERD, J. DESSING & R. PALIWODA : Development of an Autonomous Cow-Milking Robot Control System, IEEE Control Systems Magazine, 11-19, 1990.
- 6) KUMAR, A. & K.J. WALDRON : The Workspaces of a Mechanical Manipulator, Transactions of ASME, J. Mechanical Design, 103, 665-672, 1981.
- 7) MAKINO, H. : Standard Performance Test Methods for Planar Positioning Assembly Robots, Annals of the CIRP, 34, 33-36, 1985.
- 8) MILLER, R.H., L.A. FULTON, B. EREZ, W.F. WILLIAMS & R.E. PEARSON : Variation in distances among teats of Holstein cows : Implications for automated milking, J. Dairy Sci, 78, 1456-1462, 1995.
- 9) MOTTRAM, T.T. : Passive Methods of Modifying Cow Posture for Automated and Robotic Milking Systems, J. Agric. Engng Res., 52, 285-293, 1992.
- 10) 日本ロボット学会編 : ロボット工学ハンドブック, 248-250, コロナ社, 1995.
- 11) ROSSING, W. & P.H. HOGWERF : State of the art of automatic milking systems, Computers and Electronics in Agriculture, 17, 1-17, 1997.
- 12) SCHINLLINGMANN, D & T.T. MOTTRAM : Automatic Milking: Development of a Robot System and Ultrasonic Teat Location, J. Agric. Engng Res., 55, 69-78, 1993.
- 13) STREET, M.J., D.S. SPENCER & R.C. HALL : The Silsoe automatic milking system, Measurement+Control, 26, 197-201, 1993.
- 14) 吉川恒夫 : ロボット制御基礎論, 25-61, コロナ社, 1992.

#### 第4章

- 1) BOTTEMA, J. : Automatic milking-reality, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 63-71, 1992.
- 2) DAVIR, S., SMITS, A.C. & ETTEMA, F.H. : The milking robot dairy farm management system, Proc. of the 3rd Int. Mastitis Seminar, 19-23, 1993.
- 3) 八谷 満・二川 毅・松岡 智・市戸万丈・桑名隆 : 乳頭が示す挙動特性に関する基礎研究, 日本家畜管理学会誌, 32 (Supple.), 30-31, 1996.
- 4) HACHIYA, M., A. HIRATA, T. KUWANA, Y. IBARAKI & Y. HISA : Design and development of a milking robot for stanchion barns, Proc. of the 1st North American Conference on Robotic Milking, Toronto, Canada, 56-59, 2002.
- 5) HALACHMI, I., J.H.M. METZ & L.SPEELMAN : Designing the optimal robotic milking barn-theory and practice, Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, Lelystad, The Netherlands, 56-57, 2000.
- 6) HIRATA, A., M. HACHIYA, T. KUWANA, Y. IBARAKI & Y. HISA : Development of a milking robot in stanchion barns, Proc. of Dutch - Japanese workshop on Precision Dairy Farming, Wageningen, The Netherlands, 33-38,

- 1998.
- 7) 平田 晃：繋ぎ飼い用搾乳ロボットの可能性と今後の課題、農業機械開発改良試験研究打合せ会議資料 No.5 (畜産分科会), 生研機構 農業機械化研究所, 89-95, 1999.
- 8) 平田 晃・八谷 満・荊木義孝・桑名 隆・西部光弘・中沢弘造：自動搾乳機, 特許番号1008330, オランダ, 1999.
- 9) HOGEWERF, P.H. & A. H. IPEMA : Milking technology for high yielding cows, Proc. of Dutch-Japanese workshop on Precision Dairy Farming, Wageningen, The Netherlands, 45-49, 1998.
- 10) HONDA, Y., S. HASEGAWA, A. IKEGUCHI & M. KAMO : R & D for precision milking technology in Japan, Proc. of Dutch - Japanese workshop on Precision Dairy Farming, Wageningen, The Netherlands, 39-43, 1998.
- 11) 柏村文郎：日本およびヨーロッパにおける搾乳ロボットの開発と実用化への歩み, 北海道畜産学会, 42, 1-10, 2000.
- 12) KLOMP,C., W. JONGKIND, G. HONDERD, J. DESSING & R. PALIWODA : Development of an Autonomous Cow-Milking Robot Control System, IEEE Control Systems Magazine, 11-19, 1990.
- 13) LENTEREN, A.C. & G. KORSTEN : Sub-optimal cow & barn condition and its effects on the visiting frequency at the milking robot, Proc. of the 1st North American Conference on Robotic Milking, Toronto, Canada, 64-69, 2002.
- 14) 野附 巖：搾乳ロボット総論, 平成12年度専門技術員研修「搾乳ロボットを基軸とした乳牛の省力飼養管理技術」, 農林水産省草地試験場・農林水産省農産園芸局, 1-13, 2000.
- 15) SCHILLINGMANN, D. & T.T. MOTTRAM : Automatic Milking-Development of a Robot System and Ultrasonic Teat Location, J. Agric. Engng. Res., 55, 69-78, 1993.
- 16) 高野政晴：ロボット機構系の設計, 日本ロボット学会誌, 4(4), 56-62, 1986.
- 17) WINTER, A., R.M. TEVERSON & J.E. HILLERTON : The effect of increased milking frequency and automated milking systems on the behaviour of the dairy cow, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz & W.Rossing (Editors), Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 261-269, 1992.

## 第5章

- 1) 阿部可治：パワーエレクトロニクスとシステム制御, オーム社, 156, 1992.
- 2) 有馬誠一・近藤 直・柴野保徳・山下 淳・藤浦建史・秋好広明：キュウリ収穫ロボットの研究(第1報), 農業機械学会誌, 56(1), 55-64, 1994.
- 3) 八谷 満・二川 毅・松岡 智・市戸万丈・桑名隆：乳頭が示す挙動特性に関する基礎的研究, 日本家畜管理学会誌, 32 (Supple.), 30-31, 1996.
- 4) 金井喜美雄・堀 憲之：デジタル制御システム入門, 槇書店, 1992.
- 5) 金子敏夫：機械制御工学, 日刊工業新聞社, 73-102, 1996.
- 6) KLOMP, C., W. JONGKIND, G.HONDERD, J. DESSING & R. PALIWODA : Development of an Autonomous Cow-Milking Robot Control System, IEEE Control Systems Magazine, October, 11-19, 1990.
- 7) KONDO, K. & TING, K.C. : Robotics for Bioproduction Systems, ASAE, 38-49, 1998.
- 8) KUMAR, A. & K.J. WALDRON : The Workspace of a Mechanical Manipulator, Transactions of ASME, J. Mechanical Design, 103, 665-672, 1981.
- 9) MAKINO, H. : Standard Performance test Methods for Planar Positioning Assembly Robots, Annals of the CIRP, 34, 33-36, 1985.
- 10) 三河正彦・吉田耕一・丹野端紀・松本三千人：障

- 害物回避のための視覚に基づくマニピュレータ冗長制御と画像特徴推定, 日本ロボット学会誌, 17(4), 534-539, 1999.
- 11) MILLER, R.H., L.A. FULTON, B. EREZ, W.F. WILLIAMS & R.E. PEARSON : Variation in Distances among Teats of Holstein Cows: Implications for Automated Milking, *J. Dairy Sci.*, 78(7), 1456-1462, 1995.
- 12) 岡本嗣男・藤浦建史・白井良明・近藤 直 : 生物にやさしい知能ロボット工学, 実教出版社, 1992.
- 13) PAUL, R.P. (吉川恒夫訳) : ロボットマニピュレータ, コロナ社, 1984.
- 14) SCHILLINGMANN, D., T.T. MOTTRAM : Automatic Milking -Development of a Robot System and Ultrasonic Teat Location, *J. Agric. Engng. Res.*, 55, 69-78, 1993.
- 15) (社)精密工学会監修 : 次世代精密位置決め技術, フジテクノシステム, 439-463, 2000.
- 16) STREET, M.J., HALL, R.C., SPENCER, D.S., WILKIN, A.L., MOTTRAM, T.T., ALLEN, C.J. : Design features of the Silsoe automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), *Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking*, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 40-48, 1992.
- 17) 須田信英・中溝高好 : コンピュートロール23-システム同定の理論と技術, コロナ社, 48, 1988.
- 18) 高野政晴 : ロボット機構系の設計, 日本ロボット学会誌, 4(4), 56-62, 1986.
- 19) 吉川恒夫 : ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, 2(1), 63-67, 1983.
- 20) 吉川恒夫 : ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.
- Prospects for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 72-79, 1992.
- 2) ARTMANN, T.T. : Status, results and further development of an automatic milking system, In : A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), *Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking*, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 23-32, 1992.
- 3) BJERRING, M. & M.D. RASMUSSEN : Vacuum fluctuations in the liner during automatic milking, *Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking*, 「 64-66, Toronto, Canada, 2002.
- 4) 技術協会編 : 自動搾乳システム実用化推進事業平成11年度報告書 - 自動搾乳システム事例情報第2集, 畜産技術協会, 5-60, 2000.
- 5) DAVIS, M.A., E. MALTZ & D.J. REINEMANN : consideration of teat morphology and milking characteristics for robot milking conditions, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), *Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking*, 56-57, Lelystad, The Netherlands, 2000.
- 6) DUCK, M. : Evaluation of Duvelsdorf milking robot, In : A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), *Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking*, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 49-54, 1992.
- 7) 堂腰 顕・柏村文郎・古村圭子・池滝 孝・新出陽三 : 自動搾乳システムへの牛の馴致試験, 日本家畜管理学会誌, 32 (Suppl.), 26-27, 1996.
- 8) HEWIT, J.R. & A.G. SMITH : The robotic milking of cows, *Lect.Notes Control Inf. Sci.*, 187, 391-410, 1993.
- 9) HOGWERF, P.H., P.J.M. HUIJSMANS, A.H. IPEMA, T. JANSSEN & W. ROSSING : Observations of automatic teat cup attachment in an automatic milking system, In:A.H.Ipema,

## 第6章

- 1) ALLEN, C.J., T.T. MOTTRAM, A.R. FROST, M.J. STREET, R.C. HALL & D.S. SPENCER : Field trials of the Silsoe automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), *Proc. of the Int. Symp. on*

- A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), Proc. of Int. Symp on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 80-90, 1992.
- 10) HONDA, Y., S. HASEGAWA, A. IKEGUCHI & M.KAMO : R&D for Precision Milking Technology in Japan, Proc. of Dutch-Japanese Workshop on Precision Dairy Farming, Wageningen, The Netherlands, 39-43, 1998.
- 11) KLOMP, C., W. JONGKIND, G. HONDERD, J. DESSING & R. PALIWODA : Development of an autonomous cow-milking robot control system, IEEE Control Systems Magazine, October, 11-19, 1990.
- 12) KONING, K., Y. VORST & A. MEIJERING : Automatic milking experience and development in Europe, Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking, 11-11, Toronto, Canada, 2002.
- 13) LINDE, R. & J. LUBBERINK : Robotic Milking System (RMS)-design & performance, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 55-62, 1992.
- 14) MACHUHOVA, J. & R.M. BRUCKMAIER : Oxytocin release, milk ejection and milk removal in the Leonardo multi-box automatic milking system, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), Proc. of the Int. Symp. on Robotic Milking, Lelystad, The Netherlands, 184-185, 2000.
- 15) MARCHAL, P., L. WALLIAN, G. RAULT & C. COLLEWET : Investigations on the behavior of dairy cows during robotic milking, In: Ipema A.H. et al. (Eds.), Proc. of 3rd Int. Dairy Housing Conference "Dairy Systems for the 21st Century", 415-425, 1994.
- 16) MILLER, R.H., L.A. FULTON, B. EREZ, W.F. WILLIAMS & R.E. PEARSON : Variation in distances among teats of Holstein cows- Implications for automated milking, J.Dairy Sci., 78, 1456-1462, 1995.
- 17) MOL, R.M. & W. OUWELTJES : Detection model for mastitis in cows milked in an automatic milking system, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, 97-107, Lelystad, The Netherlands, 2000.
- 18) MOTTRAM, T.T., J. HART & R. PEMBERTON : Biosensing techniques for detecting abnormal and contaminated milk, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, 108-113, Lelystad, The Netherlands, 2000.
- 19) ROSSING, W. & P.H. HOGWERF : State of the art of automatic milking systems, Computers and Electronics in Agriculture, 17, 1-17, 1997.
- 20) SCHILLINGMANN, D. & T.T. MOTTRAM : Automatic Milking- Development of a robot system and ultrasonic teat location, J. of Agric. Engng. Res., 55, 69-78, 1993.
- 21) STEFANOWSKA, J.M., P.J. HUIJSMANS, P.H. HOGWERF, A.H. IPEMA & A. KEEN : Behaviour of cows before, during and milking with an automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 278-288, 1992.
- 22) STREET, M.J., R.C. HALL, D.S. SPENCER, A.L. WILLKIN, T.T. MOTTRAM & C.J. ALLEN : Design features of the Silsoe automatic milking system, In: A.H.Ipema, A.C.Lippus, J.H.M.Metz, W.Rossing (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publ. No.65, Wageningen, The Netherlands, 40-48, 1992.
- 23) STREET, M.J., D.S. SPENCER & R.C. HALL : The Silsoe automatic milking system, Measurement+Control, 26, 197-201, 1993.

- 24) 高岩昌弘：空気圧サーボの応用事例，フルイドパワーシステム，日本油空圧学会，32(2)，85-89，2001.
- 25) TSENKOVA, R, K. MURAYAMA, S. KAWAMURA, K. ITO & K. TOYODA : Near infrared mastitis diagnosis in the process of milking, In: H.Hogeveen & A. Meijering (Eds.), Proc. of Int. Symp. on Robotic Milking, 127, Lelystad, The Netherlands, 2000.



## SUMMARY

### A Study on Milking Robot System in Stanchion Stall Barn

Mitsuru HACHIYA, Akira HIRATA,  
Kazutomo ICHITO, Takashi FURUYAMA, Isao FUKUMORI

The development of automatic cluster attachment was a real challenging step. From the end of the eighties to the beginning of the nineties, a series of cluster attachment principles was exploited in several research institutes and companies in Europe. The first milking robots were installed in commercial dairy farms in the Netherlands in 1992. The breakthrough of automatic milking came at the end of the nineties. At the end of 2001, over 1,100 farms world-wide milked their cows automatically. The success of the automatic milking system used in free stall barns in Europe suggests that it will also save dairy farmers in Japan from the hard work of milking. However approximately 90% of the dairy farmers in Japan do their milking in stanchion barns, so they require new technologies to cover their workloads different from those in free stall barns. To meet these requirements, this research and development study on milking robot for use in stanchion barns was carried out in the Institute of Agricultural Machinery-BRAIN in Japan from 1993 through 1998.

#### 1. Review and objectives of the study

The first idea about fully automating the milking process was acquired in the mid seventies. Cost of labor in several countries, especially in Japan, was growing and this was one of the main reasons to start the development of automation of milking. In the past the dairy farmer was compelled to a continuous labour schedule without any interruption, which eventually could cause severe vocational stress. This constraint also led to a production rhythm, determined by considerations of human labour, rather than by the physiological requirements of the animals. A "process control" by the animal, coupled with an "observation function" of the dairy farmer becomes increasingly possible in fully automated, computer controlled dairy farming. The main sectors for computer-based control in dairy farming have been classified as:

- animal feeding;
- monitoring of animal performance and health;
- milking;

Two computer-based methods of automated feed rationing are currently in use:

- individual concentrate rationing and milk yield measurement by control computer, complied with free roughage consumption;
- individual concentrate and roughage rationing based on milk yield measurements.

The last step towards the full computer-based control of dairy farming, namely the automatic teat cups attachment to the udder had not been completed yet, but recent developments in sensor and computer technology including robotics have removed at least the technical barriers for the completion of this final step. The process element "teatcup attachment" can be divided into two parts:

1. localizing the teats
2. cluster handling and positioning.

Since the mid-1980s prototypes for automatic attachment of teatcups have been for the free stall barns developed in a number of countries. Some of the systems developed by the company or the research institutes were installed in mid-1990 on the experimental farms. In the first years after the introduction of the first Automatic Milking Systems (AMS), the adoption went slow, until 1998. From that year on, in the Netherlands automatic milking became an accepted technology by a large part of the dairy sector and in the same period also other countries adopted AMS, like Germany, Denmark and France. At the end of 2001, worldwide more than 1,100 commercial farms used one or more the systems to milk their cows. The success of the AMS used in free stall barns in Netherlands, etc. suggests that they will also save dairy farmers in Japan the hard work of milking. However, approximately 90% of the dairy farmers in Japan do their milking in stanchion barns, they require a new technology to cover varying workloads. To meet such requirements, Institute of Agricultural Machinery-BRAIN has been working on the of a milking robot for use in stanchion barns since 1993. In case of milking robot for use in stanchion barns, robot has to approach to each milking cows tied in stall and several choice had to be made:

- Cow friendliness. Since the cows should return unprompted they have to be treated in a friendly and gentle way. This means no active fixation.
- Sensing udder and teat position. A cow always needs to be able to move. A sensing controlling the attachment robot is necessary to locate and follow her.
- Robot system. The robot system is necessary to test and prove techniques on the field trails. The robot is driven by electric motor and carried a single teat cup that could be applied to all four teats in sequence.

We laid these considerations as the basic conception for the designing of milking robot (prototype) for use in stanchion stall barns.

## 2. Variance with time elapsed in teats placement of lactating Holstein cows

The objectives of this chapter are to document the effects of parity, stage of lactation and milk yield on means and variances of distances between teats with which to determine the range of design parameters that the milking robot must incorporate. Distances between teats were measured immediately prior to milking in 41 Holstein cows to assess the variation due to age (parity) and stage of lactation. Parity differences were highly significant for all traits in all analyses ( $P < 0.01$ ). The distance between front teats pre-milking was 1.6-1.8 times of that for rear teats and 1.2-1.6 times of that for side teats. In spite of increase of daily milk yield in early lactation, distances among teats decreased linearly with the stage of lactation. Reduction in teat distances with the stage of lactation was proportionally much greater for distance between rear teats (45 to 60% in particularly late lactation) than for other distances. The distance between rear teats for first parity appeared to present the greatest obstacle to robotic teatcup attachment. For designing the end-effector of mechanical robot and control system, full attention should be paid to teat morphology, especially extremely narrow distance between rear teats for first parity and wide distance between front teats for older

cows. The differences of distance between right and left side teats were very small, so the asymmetrical for side teats did not seem to hinder the robot in attaching the teatcups. In a study of 15 lactating Holstein cows measured at milking and at 0, 1, 2, 4, 6, and 8h after morning milking, distances among teats increased linearly with the time after milking and furthermore the change in distance between rear teats decreased significantly ( $P < 0.05$ ) with the stage of lactation period. The reduction in teat distances caused by milking for early, mid, and late lactation were similar, although much greater reduction was found for distance between rear teats (43 to 55%) than that for other distances. Data of teat positions stored in computer suggested the possibility of using them for attachment at fixed intervals for several days in late lactation. Incorporation of the profiles of teat distances with stage of lactation and the changes that occur between milkings into the designing of mechanical components and control software for the robot system would enable development of more reliable milking robot system. Especially the sensing area for teat can be minimized, thereby reducing the chance of sensing a leg or a wrong teat.

### 3. Basic structure and physical parameters of mechanical system

To make practical application of cows' body measurements to the optimum design of mechanical milking robot system in stanchion barns, a series of body measurements was conducted with 111 lactating Holstein cows.

The robot approaches to the tied cow from the back of the stall and the "Global Positioning Unit (GPU)" holds the cow at the right and left hip bones and the rear end of the rump, where few deformations occur. From this position, the milking robot can follow the back/forth and lateral motions of the cow while constantly maintaining its position relative to the cow. On this basic concept for mechanical design, we examined the pre-contact safety strategies for cow and milking robot, especially robot manipulator. The workspace and fundamental mechanism for manipulator were expressed by several variables. They were distances between fore and hind legs, height of teat tips and abdomen, and relative distance between rear teats and hind legs, etc. And because it is not easy to obtain enough space between hind legs, manipulation of single teat cup instead of spatial positioning is thought to be promising, and even then four degrees of freedom for manipulation mechanism are found to be sufficient. The four degrees of freedom consist of: two for planar positioning (X and Y co-ordinates), one for planar orientation (rotation about Z-axis), and the other for attaching a teatcup onto the target teat position. The last movement (Z) is perpendicular to the positioning plane. The substantial working area for robot was assumed to be 350mm×350mm, and the center of the area to be a position that is 380mm apart from the rump on X-axis. Furthermore, this is the space that every point can be reached by a reference point on the manipulator hand with the hand in any desired orientations. Simplified calculation based upon the "inverse kinematic formulas" revealed effectiveness of our redundancy control method for avoiding obstacles. Based on the size of this working area, the link lengths of upper arm( $l_1$ ), fore arm( $l_2$ ) and hand of manipulator( $l_3$ ) in X-Y horizontal plane were decided as 400mm, 350mm and 200mm respectively. The ideal position of the robot origin is proposed as follows: X co-ordinate is 580mm from the rump and Y=500mm; these were decided as the nearest distance of the "Standard Workspace" from the origin of the robot.

When robotic operation is performed in the standard workspace, the axis of hand for planar orientation is to be controlled parallel to the axis of cow's body to avoid obstacles of hind legs.

#### 4. System component and concept of task planning for teat cup attachment

The aim of this chapter is to develop a milking robot system that will automatically attach teatcups on cows in stanchion stall barns. The prototype comprises three main components: a mobile truck that travels on rails, the GPU hung from the truck by rollers, and the automatic milking unit (total weight: 20kg) mounted on an end of the GPU written in the previous chapter. The robot approaches the tied cow from the back of the stall and the GPU holds the cow body at the right and left hip bones and the rear end of the rump, where there are few deformations. From this position, the milking robot can follow the back-and-forth and lateral motions of the cow while constantly maintaining its position relative to the cow. The connection with milk tap is made in the cow-holding process.

The automatic milking unit is composed of a magazine arm, a robot manipulator and a ball-screw mechanism to control the height of these components. The magazine arm has four cup holders for the front and rear teats that unfold just below the udder, parallel with the axis of the cow. The teatcup magazine supports the teatcups at the height where they are held by an end effector. After they are removed from teats, they are recovered into each cup holder of the magazine below the udder. To compensate for the differences in teat placement among cows, a mechanism slides the magazine for the front teats back and forth and the magazine for the rear teats laterally.

The robot manipulator is an articulated robot provided with three degrees of freedom in horizontal planes, where an AC servomotor (50W, 30W, and 30W) controls each axis. A pneumatic gripper is used for the end effector that holds the teatcup, with a local teat sensor installed above it. A local teat sensor, with a capturing area of 80mm×66mm with a matrix of 10 infra-red light beams to detect the teat, guides the robot to coincident the position of the center of the cup to the teat. The ball-screw mechanism has a movable range of 200mm and can be adjusted to any teat height between 350 and 550mm.

The robot manipulator unfolds from the initial position into the stage of picking up teatcups with the first arm (45°) and second arm (90°) simultaneously and the third arm (135°), so as to avoid any interference with the cow's body, particularly the forelegs. The unfolding operation is kept constant regardless of the individual cow bodies. In the cup attachment after the unfolding, the end effector approaches each teat from the front of the udder, while maintaining its position parallel with the axis of the cow's body. This method prevents any collision with the hind legs and facilitates the search for the teat within the limited space between the hind legs. After the cup attachment is completed, the arms are folded using the unfolding process in reverse.

#### 5. Control system for tracking teat movement and manipulability of robot manipulator

This chapter deals with designing a positional feedback controller for a manipulator with 3 rotational joints on a X-Y plane that follows the teat movements. The frequency response of the 1st, 2nd and 3rd joint of the manipulator indicated that the natural frequency of the axes were 3.5Hz,

4.5Hz and 4.5Hz, respectively. Although the gain rate was set to 5 to stabilize the control system, it can fully follow the motions up to 0.7-0.9Hz. Positional commands are sent to the servo drivers at intervals 20ms via a positioning pulse distributor so that the deviation is less than the set value. We assessed that the manipulator will not be disturbed by teat movements during practical use, based on the frequency of teat motions obtained in our preliminary study in chapter 3. The local teat sensor measures the location of the teats of the cow. The measured informations are the input for the loop controller. This controller generates a new setpoint for the robot in Cartesian space and the setpoint is converted into the encoder positions of the each motor axes by means of the inverse kinematic formulas.

The manipulator with 3-D.O.F. is essentially the same as one with 2-D.O.F., when the manipulator in the 3rd joint is kept parallel to the cow's body axis. This allows the inverse kinematics of the 3-D.O.F. system to be expressed more simply. Furthermore, it is important that a manipulator can easily move its end-effector from point to point in the operational space without taking singular points. The manipulability measure gives a numerical value to the ease of movement. A manipulator's mechanism should be designed so that the manipulability measure is large during its operation. The manipulator model designed has a relatively large operational space and be able to work efficiently with high manipulability measure, over 80% in the operational space. This means that the manipulator will know the contours and movements of the cow's body so that it can quickly and easily attach teat-cups to the udder.

## 6. Algorithm for teat cup attachment and field trials of a milking robot

An algorithm to attach and release teatcups using an articulated robot manipulator with a 4 degrees of freedom, has been developed. For successful teatcup attachment the articulated robot manipulator must be able to adjust itself to subtle inclination and various movements of teats. After the GPU holds the cow body at the right and left hip bones and the rear end of the rump, where there are few deformations, and then the robot manipulator moved from the parked position to attach the teatcups. The robot takes the teatcups, one at a time, from a magazine and attached them to the teats in the order left rear, right rear, left front, right front before returning to the parked position. A local sensor determines the center of teat, and the end effector raises the cup to the teat. Attachment was completed by moving the robot so that the position of the teat in a sensor array was central over the teat cup to which vacuum was applied. The teat cup was released from the robot end effector when the vacuum in the milk line indicated that the teat cup was sealed.

Field trials for the milking robot system on two milking cows were performed after the operational stability of the system was ensured using a dummy cow. Two milking cows were subjected to the tests, considering the udder conformation and temperament of them. Attempts to familiarize the cows with the milking robot were made for a week according to the following procedures:

- 1) Holding of the cow body by the GPU.
- 2) Milking by a bucket milker in the prototype stall.
- 3) Manual attaching of the automatic milking unit.

#### 4) Learning of teat positions

Milk ejection and teat cleaning before the cup attachment were performed manually. Learning teat positions took approximately 70 seconds.

The GPU was not accurate enough when only recorded positions of teats were used for attachment, though it worked well for the initial approach to teats. But when the local sensor worked, it could detect the deviation and lead the cup to the center of the teat. The GPU always maintains contact with the body of the cow, which enables the automatic milking unit to keep a fixed relative position and follow teat movements smoothly. The automatic attachment of the teat cups was achieved in approximately 60sec. Teat cup vacuum decreased from 48 to 20kPa in less than 0.2sec after attachment, which means that attachment required minimal air inflow. The cow did not raise or kick her hind legs during the robot operation. Furthermore, it was confirmed that any shuffling motion of the cow during the cup attachment and milking could be fully compensated by the GPU following the cow's body. These results showed that the milking robot is a practical milking system.

As described above, we were able to confirm the basic adaptability of a prototype milking robot for use in stanchion stall barns from the tests of attaching teat cups on milking cows. Some difficult problems remain unsolved, such as automatic teat cleaning method that can be applied to stanchion stall barns or how to transport the robot automatically. We will endeavour to find their solutions in the near future.

## 謝 辞

本研究では、搾乳ロボットに関して社会的ニーズ、牛体構造と牛の飼養管理形態に伴う設計開発の戦略、要素技術、ロボットマニピュレータおよび制御システムの設計開発、開発システムの総体的な評価試験などかなり広い範囲から検討した。研究の過程で試作した繋ぎ飼い用搾乳ロボットシステムには、まだ多くの解決すべき要素技術が残されており、現時点で実用化には至っていないが、この中から将来何らかの形で適用できる技術があるものと自負している。

本研究は、課題の設定から今日に至るまで諸先輩、同僚、後輩、共同研究者のご支援はもちろんのこと、周辺技術の進歩とその先端技術を筆者らが利用できる形で提供して下さった方々の御助力により進展してきたものである。

本論文の終わりに当たり、本研究着手以来ご指導・ご鞭撻を賜わり、かつ2度にわたる海外調査の機会を与えていただいた生物系特定産業技術研究推進機構 菅原敏夫、木田滋樹歴代機械化促進担当理事、ならびに同 諏澤健三、石東宣明（現 島根大学地域開発科学科教授）、八木 茂歴代畜産工学研究部長の各位に衷心から感謝の念を捧げる。本研究の揺籃期から研究全般にわたるご指導・ご激励を賜わった生物系特定産業技術研究推進機構 桑名 隆畜産工学研究部交流研究員（現 農業機械学会事務局長）、またオリオン機械株式会社の荊木義孝氏ほかの皆様、株式会社コアの比佐慶夫氏ほかの皆様には、研究の過程で共同研究者として多大なるご協力をいただい

た。記して、関係各位に深甚の謝意を表するものである。

搾乳牛の体尺測定調査では、帯広畜産大学畜産管理学科の故新出陽三教授、柏村文郎助教授（現 帯広畜産大学畜産科学科教授）ほか講座の各位、農林水産省畜産試験場 加茂幹男施設利用研究室長（現 農業・生物系特定産業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター傾斜地基盤部長）ほか業務科職員各位、農林水産省草地試験場 佐々木泰弘元調製工学研究室長ほか業務科職員各位、栃木県酪農試験場 国米 茂元飼養技術部長ほか業務科職員各位、千葉県畜産センター 江畑富夫元飼養技術研究室長、遠藤 篤研究員（現 千葉県畜産総合研究センター生産環境部生産工学研究室長）ほか業務科職員各位、また、試作システムの搾乳試験に際しては、農林水産省畜産試験場 長谷川三喜施設利用研究室長（現 農業・生物系特定産業技術研究機構畜産草地研究所家畜管理工学研究室長）、本田善文主任研究官（現 農業・生物系特定産業技術研究機構畜産草地研究所施設工学研究室長）のほか業務科職員各位のご協力をいただいた。ここに記して関係各位に謝意を表する次第である。さらに、研究の途次、膨大な研究データ資料の整理に当たってご苦勞をお掛けした元 畜産工学研究部飼料調製利用工学研究単位の山田晶子女史に御礼の意を述べたい。

最後に、本研究を論文として取り纏めるに当たり、格別のご配慮を賜わるとともに、懇切丁寧なご指導を戴いた北海道大学大学院農学研究科 松田従三教授に心から感謝する次第である。

---

農業機械化研究所研究報告 第 33 号

平成17年1月 印刷・発行  
頒価735円(本体価格700円)

Technical Report of Institute of  
Agricultural Machinery No.33

〒331-8537  
埼玉県さいたま市北区日進町1丁目40番地2

1-40-2, Nisshin, kita, Saitama-city, Saitama,  
331-8537 Japan  
Tel. 048-654-7000

独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構  
生物系特定産業技術研究支援センター  
農業機械化研究所

Institute of Agricultural Machinery  
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution  
Incorporated Administrative Agency National Agriculture and Bio-oriented Research Organization