

OS2-3

上肢障害者のための食事支援システムの開発研究

Development of meal support systems for persons with upper extremity

○ 鈴木亮一 (金沢工業大学) 西田祐貴 (金沢工業大学) 大庭亮 (奈良先端科学技術大学院大学)

小澤智 (金沢工業大学) 小林伸明 (金沢工業大学) 田中幹也 (山口大学)

Ryoichi SUZUKI, Kanazawa Institute of Technology
 Yuki NISHIDA, Kanazawa Institute of Technology
 Ryo OHBA, Nara Institute of Science and Technology
 Satoshi OZAWA, Kanazawa Institute of Technology
 Nobuaki KOBAYASHI, Kanazawa Institute of Technology
 Kanya TANAKA, Yamaguchi University

Robotic assistive devices are increasingly used to improve quality of life of persons with disabilities. Japan has now more than one million people with upper extremity disabilities. Assistive devices will be useful for eating and drinking anywhere anytime without any assistance, and caregivers will be able to reduce efforts needed for providing meals. The purpose of this paper is to propose robotic meal-eating devices for people with upper extremity disabilities. Two prototypes, assistive devices for eating and drinking, are designed and developed for experimental validation and performance evaluations.

Key Words: Assistive devices, Meal support system, Upper limb disability

1. はじめに

事故や病気、加齢により日常の動作を十分に行えない身体障害者は、現在日本には約 360 万人いるといわれている。その中で、手足が完全麻痺もしくは欠損している障害者の数は 100 万人以上ある。このような人々を対象とした食事支援システムは既に存在するが大変高価であり、使用者の利便性を向上するため更なる改善が求められている。

本研究では、上肢の運動機能を完全に失った方や加齢に伴い上肢機能障害がある方を対象とし、自らの意思で食事と飲料摂取の双方を可能とする食事支援システムの開発を目的とする。これまで介護者の助けを必要としていた人々が、音声入力や視線入力の指示をもとに、口唇位置まで飲み物や食べ物を提供する食事支援システム (Fig. 1) を提案する。本稿では、口唇位置の認識と飲み物と食べ物の運搬、及び内部モデル制御を応用した安全機能について紹介する。

2. 食事支援システムの概要

2-1 飲料摂取支援ロボットの概要

提案する飲料摂取支援ロボットを Fig. 2 に示す。本ロボットは、視覚情報を元に利用者の口唇位置を検出し、検出した口唇位置にコップを運搬し、飲料摂取支援を行う。口唇の検出には、カメラ及び画像情報ライブラリ OpenCV を用いる。Fig. 2 に示すように、先端に搭載されたカメラからの視覚情報を元に、口唇位置を検出し、その検出した位置までコップを運搬する。

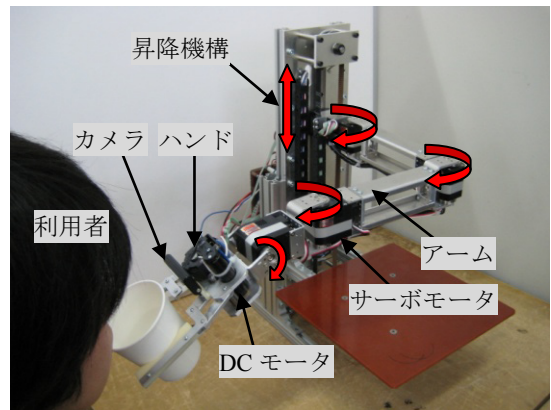


Fig. 2 Assistive device for drinking

2-2 食べ物支援ロボットの概要

食べ物を支援する補助装置として、Fig. 3 に示す食べ物支援ロボットを提案する。また動作手順を Fig. 4 に示す。使用者からの指令により、食べ物を掬い、使用者の口もとまで運搬する。

既存の食事支援ロボットとしてセコム社のマイスプーン⁽¹⁾がある。マイスプーンは上肢障害者の食事を支援する数少ないロボットのひとつであるが、やわらかい半固形物やスープのような液体類に対応できないという問題がある。

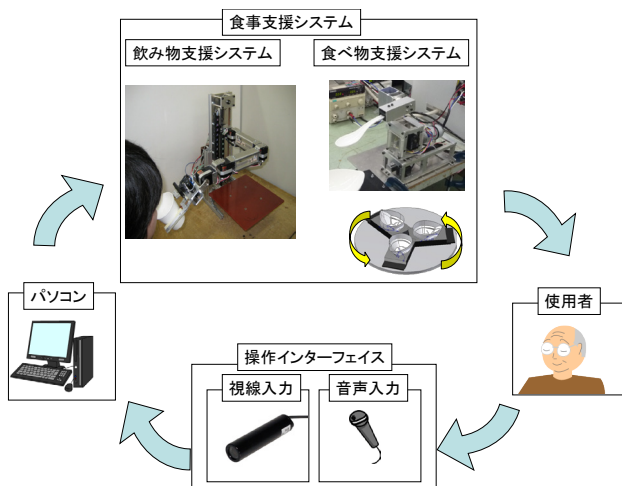


Fig. 1 Meal support system

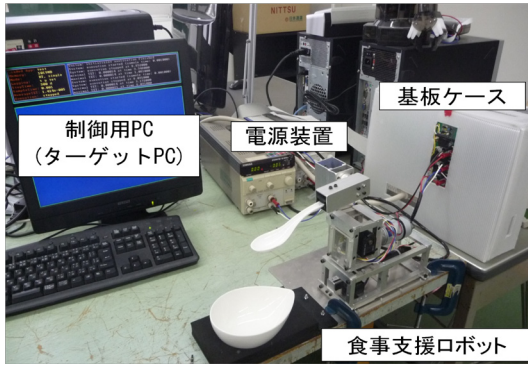


Fig. 3 Assistive device for eating

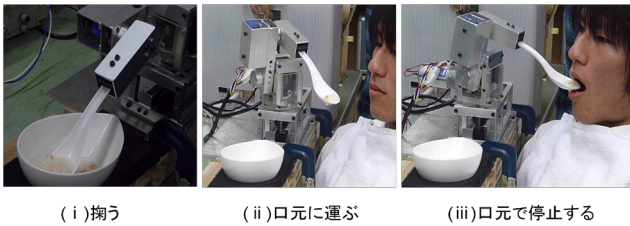


Fig. 4 Operation procedure

この装置の動作は、決められた使用者の口元まで食べ物を運搬することに限定している。また、使用者の口元が決められた目標位置より前方にある場合には、内部モデル制御の外乱推定特性を応用した停止機能が働き、ロボットが安全に停止する機能を有する。

3. 食事支援システムの特徴

3-1 飲料摂取支援における CP 制御を用いたアーム先端の軌道制御

アーム先端の軌道制御には、現在位置から目標位置までの軌道が直線となる CP 制御を用いる。アーム先端の現在位置を P_0 、目標位置を P_f とし、制御のサンプリングタイム Δt 、軌道上での目標速度 V により、1 回のサンプリングタイムで移動する先端位置の移動ベクトル ΔP は、

$$\Delta P = \frac{P_f - P_0}{\|P_f - P_0\|} V \Delta t \quad (1)$$

と表される。したがって、 i 番目の目標位置は

$$P(i\Delta t) = P_0 + i\Delta P \quad (2)$$

と求めることができる。この目標位置について逆運動学を解き、アーム先端を任意の点に対し直線的に移動させる。

3-2 飲料摂取支援におけるカメラを用いた口唇位置の検出及び補正

使用者の口唇位置の検出は、カメラからの視覚情報を用いて行う。Fig. 5 にカメラの画像情報を示す。画像の肌色領域のみを抽出し、その領域を白色に二値化した画像を Fig. 6 に示す。この白色部分の重心を使用者の口唇位置として検出する。また、使用者の口唇が左右にずれたことを想定し、 x 軸方向のみについて口唇位置の補正を行う。口唇の x 軸方向の位置を x_u とし、この値とカメラ画像の中心位置 x_c との差を err とする。この err が 0 に近づくように、常にカメラの中心が口唇位置と同じ位置にくるよう補正を行う。

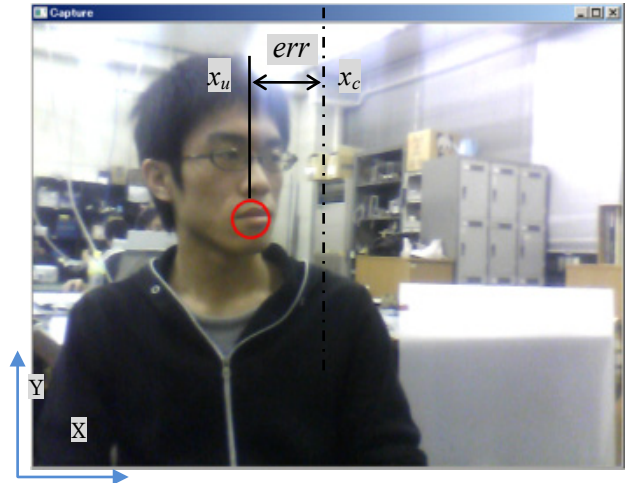


Fig. 5 Camera image

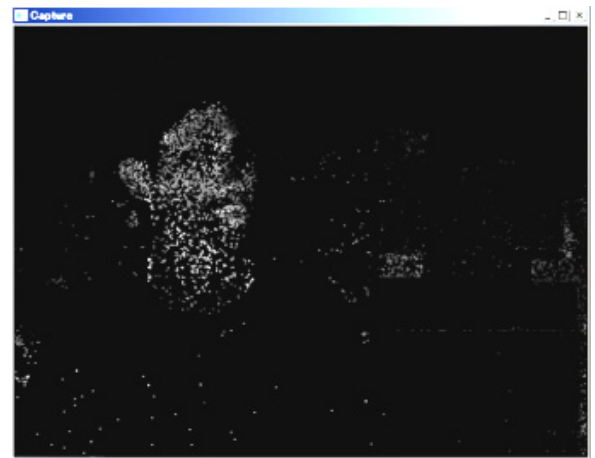


Fig. 6 Binarization image

3-3 食べ物支援におけるスプーンの上方向の制御

食べ物を掬う動作、つまりスプーンの上方向の制御系を図 Fig. 7 に示す。Fig. 7 において、 $P(s)$ は制御対象、 $C(s)$ は PID コントローラ、 r_s は目標移動角度、 u_s は操作量、 ξ_s は入力端に加わる外乱、 y_s は出力角度、 e_s は目標値との誤差を表す。

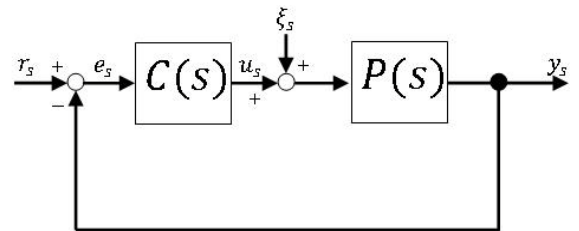


Fig. 7 Control system for spoon up

3-4 食べ物支援におけるアームの運搬制御

安全停止機能を有するアームの制御系の構成を Fig. 8 に示す。Fig. 8 において、 Σ_{af} はフィードバックを施した制御対象、 $\bar{\Sigma}_{af}$ は Σ_{af} のモデル、 $\bar{\Sigma}_{af}^{-1}$ は $\bar{\Sigma}_{af}$ の近似逆システム、 ξ_a は外乱(唇や顔からの反力)、 $\hat{\xi}_a$ は外乱推定値、 r_a は目標角度、 u_a は制御入力、 θ_a はアームの出力角度である。

目標角度は 90 度とし、食べ物を運搬中に(目標角度に到達する以前に)顔や口元に触れると安全機能が働きアームが停止する。これは、内部モデル制御の外乱推定特性⁽²⁾を

応用したもので、あらかじめ設定した外乱設定値に対して外乱推定値がその値を超えたか否かを、圧力センサや力センサを用いることなく検知できる制御方法を実装しているからである。

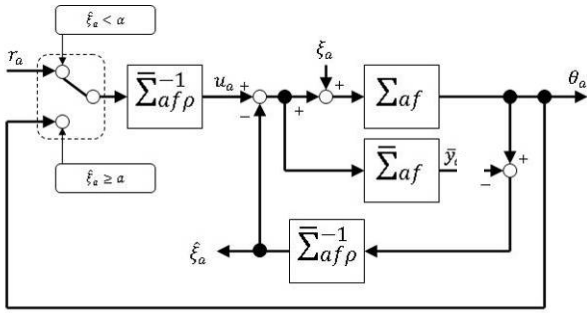


Fig. 8 Control system for providing meal

制御系に必要な数式モデルは Fig. 9 のモデルから導出する。 u_a はモータのトルク、 θ_a はアームの出力角度である。 J_a はアームの慣性モーメント、 c_a は駆動軸の粘性抵抗係数である。

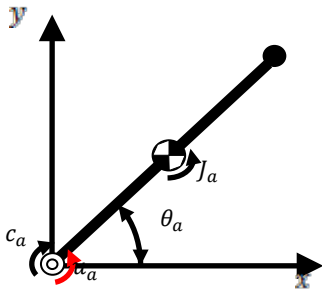


Fig. 9 Modeling of arm on horizontal motion

アームの運動方程式は

$$J_a \ddot{\theta} + c_a \dot{\theta} = u_a \quad (3)$$

となる。これを状態変数表現し、状態フィードバック $u_a = -\mathbf{k}_a \boldsymbol{\theta} + v$ (ここで $\mathbf{k}_a = (k_{a1} \ k_{a2})$) を施したモデルは次のように記述される。

$$\bar{\Sigma}_{af} : \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_1}{J_a} & -\frac{k_2+c_a}{J_a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_a} \end{pmatrix} v \\ \theta_a = (1 \ 0) \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

さらに、この近似逆システムを求めると

$$\bar{\Sigma}_{af}^{-1} : \begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\rho^2} & -\frac{2}{\rho} \end{pmatrix} \mathbf{z} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} q \\ \boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} \frac{k_1}{\rho^2} - \frac{J_a}{\rho^4} & -\frac{2J_a}{\rho^3} + \frac{(k_2+c_a)}{\rho^2} \end{pmatrix} \mathbf{z} + \frac{J_a}{\rho^2} q \end{cases} \quad (5)$$

を得る。 $\boldsymbol{\theta} = (\theta \ \dot{\theta})^T$ はモデルの状態、 q は近似逆システムへの入力、 $\boldsymbol{\omega}$ は近似逆システムからの出力、 $\mathbf{z} = (z \ \dot{z})^T$ は近似逆システムの状態、 ρ は近似逆システム的设计パラメータである。本研究においては、慣性モーメントを $J_a = 7.33 \times 10^{-3} [kgm^2]$ 、粘性抵抗係数を $c_a = 2.86 \times 10^{-1} [N \cdot s/m]$ 、近似逆システムの係数を $\rho = 0.10$ 、フィードバックゲインを $\mathbf{k}_a = (6.71 \ 0.14)$ とした。

4. 実験結果

4-1 飲料摂取支援における動作実験及び口唇位置の検出

目標位置を3つ設定し、それらを結ぶ目標軌道上をアーム先端が移動した軌跡を Fig. 10 に示す。アーム先端の移動点が概ね目標軌道に追従していることがわかる。これより、CP制御によりアーム先端の軌道を十分に制御することができ、使用者の口唇まで確実にコップを運搬できるといえる。

次に、カメラの画像に基づいてアーム先端における口唇位置の追従実験の結果を Fig. 11 示す。約1秒で利用者の口唇とカメラ中心の偏差が0付近となっている。これより、口唇位置の検出後に、アーム先端を常に口唇の位置を追従し検出できていることがわかる。

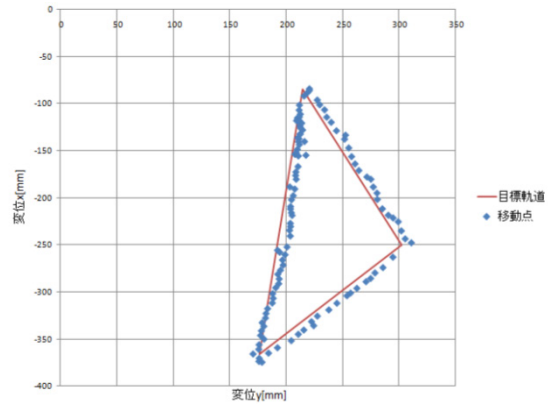


Fig. 10 Trajectory tracking result of end effector

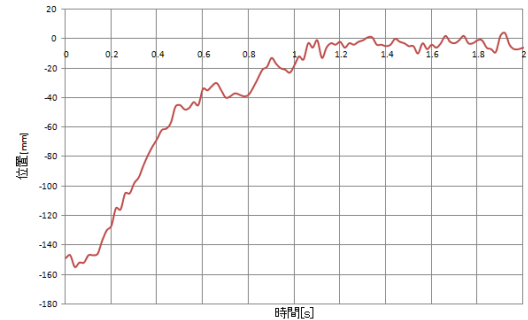


Fig. 11 Position tracking of lips of user

4-2 食べ物支援における提供可能な食べ物の確認

試作した食べ物支援ロボットにおいて、スプーンで掬うことが可能な食べ物は Table 1 のとおりである。マイスプーンでは提供が難しいとされる、おかゆ、カレー、スープの提供も可能であることがわかる。

Table. 1 Availability of meal

分類	掬った食べ物	成否
主食	おかゆ	○
	炒飯	○
主菜	カレー	○
	ミートボール	○
副菜	コーンポタージュ	○
	ミニトマト	○
果実	果物の缶詰	○

現在の仕様では、一種類の食べ物しか提供できないが、入力インターフェースで制御可能なターンテーブルにより、複数の食べ物を提供することが可能となる。

4-3 食べ物支援における運搬動作実験と安全機能の評価

食べ物を掬った後、使用者の口元まで食べ物を運搬する動作実験を行った結果を Fig. 14 及び Fig. 15 に示す。目標角度は 90 度(1.57[rad])とし、使用者が決められた位置に座っている場合と(Fig. 12)、使用者が決められた位置より前方に顔がある場合(Fig. 13)の 2 つの状況を想定し実験を行う。また、後者の場合には、実装した安全機能が動作していることを実験により確認する。それぞれの結果を Fig. 14 及び Fig. 15 に示す。

Fig. 14 において、アームの目標角度と出力角度が一致しており、あらかじめ設定した目標位置までスプーンを移動し食べ物を運搬できていることが実験結果より読み取れる。

一方 Fig. 15 では、使用者の顔が通常的位置より前方にあるため、約 3 秒後にスプーンが口元に触れたことを検知し、その場でスプーンが停止していることがわかる。このとき、外乱推定値があらかじめ設定した外乱設定値を負の側に超え、その時点でそれ以上アームを回転させていないことが出力角度の値から読み取れる。つまり、提案する制御方法の安全機能が効果的に働いていることがわかる。

これらの実験結果より、スプーン先端が描く軌跡上に使用者の口元が存在すれば、正確かつ安全に食べ物を提供できることを実験により確認した。

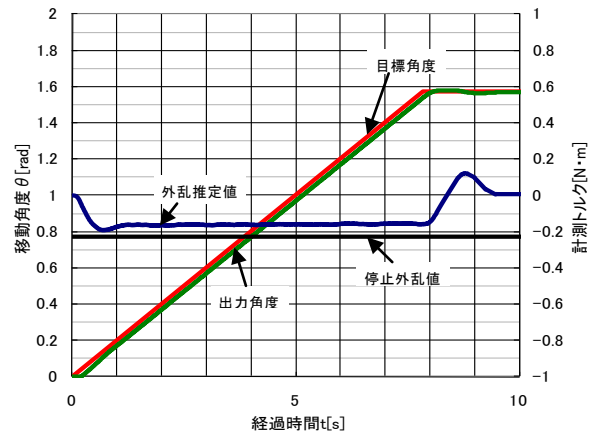


Fig. 14 Experimental results on usual position

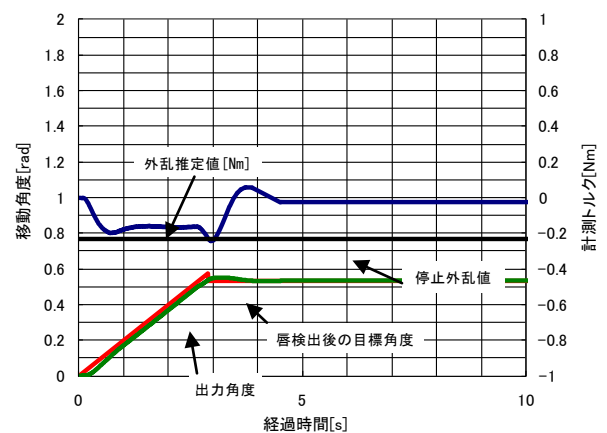


Fig. 15 Experimental results on unusual position

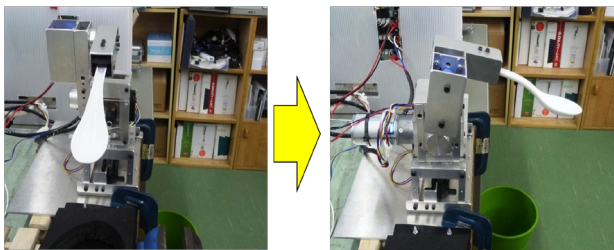


Fig. 12 Experimental overview: usual position

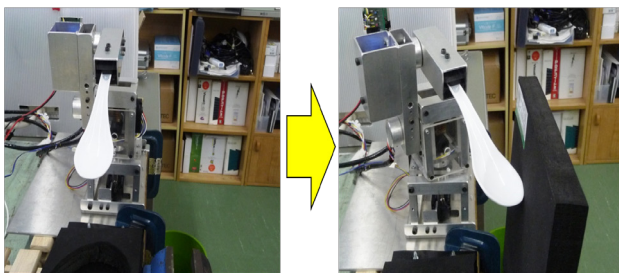


Fig. 13 Experimental overview: unusual position

5. 結言

本研究では上肢の運動機能を失った人々や、加齢に伴い上肢機能に障害を抱える人々が使用可能な、食べ物と飲料摂取の双方を支援する食事支援システムの試作機を開発し、それらの動作実験及び評価を行った。飲料摂取支援ロボットでは、カメラを用いて唇を検出し、利用者の唇にコップを運ぶことを確認した。また、食べ物支援ロボットでは、マイスプーンで対応できなかった様々な形状の食べ物を提供できることを確かめた。また、このような食事支援システムにおいて内部モデル制御の外乱推定特性を応用した制御方法が、安全性を高めることに有効であることを実験的に確かめた。

本研究で試作したロボットは、現在はそれぞれが独立したシステムであるが、今後音声入力システムや視線入力インタフェースと統合し、食べ物支援と飲料摂取支援が同時に可能なシステムの開発を目指す。

参考文献

- (1) セコム(株), マイスプーン(食事支援ロボット), <http://www.secom.co.jp/personal/medical/myspoon.html>
- (2) 小林, 鈴木, 長谷川, 土肥: 内部モデル制御と最適レギュレータの極限的性質を用いた外乱推定とその実験検証, 日本機械学会論文集(C編), 70巻695号, pp. 96-103, 2004.