

2025年 9月 25日

情報・知能工学専攻	学籍番号	第173361号	指導教員	福村 直博 中内 茂樹
氏名	松田 基			

論文内容の要旨（博士）

博士学位論文名	画像と筋電を併用した機能的な義手システムに関する研究
---------	----------------------------

（要旨 1,200字程度）

上肢切断者にとって、手の機能の一部を補完する義手を使用することは生活の質を高める上で重要である。義手の要件として「装着感」「重さ」などが重視されるが、特に「把持動作」「自立性」「機能性」の点で筋電義手の期待は高い。しかし、表面筋電位を用いた制御では信号が微弱であるため、これまでの筋電義手では数種類の把持タイプ（握る、摘まむ等）の判別が限界である。

一方で画像処理ベースのロボットハンドによる物体把持研究では、物体の種類だけでなく、形状などの把持に必要な情報を画像から抽出し、物体に合わせた多様な手姿勢を計算することが期待できる。しかしながら一般的には画像入力に対して把持姿勢（タイプ）は一つに限られる。生活空間においては例えばコップのように複数の把持タイプが考えられる物体が多く、その場合は義手使用者の意図に基づいて複数の把持タイプから決定しなければならない。

本研究では両方の手法の利点を活かし、筋電により把持タイプを選択し、画像処理から物体の種類、形状やサイズに適した手姿勢を計算することで、多様な物体に対して使用者が自然な把持運動を行える義手システムを実現することを目指す。

提案システムにおける画像処理部分では、物体の形状や大きさなどを認識することで、より多様な把持姿勢計算を目指す。そのため、人の運動学習・制御戦略をもとに提案された、Auto-Encoder (AE)を用いて把持に必要な特徴量を抽出できる視覚-運動変換モデルを画像からの把持姿勢計算に採用する。

まず初めに、視覚情報として異なる位置に置いた2種類のサイズの円柱のRGB画像、運動情報としてその円柱を持った際のロボットハンドおよびアームの姿勢情報を用いて実環境で学習と検証を行った結果、物体位置・形状情報を画像から抽出でき、このモデルの有用性を確認した。次にハンド姿勢の計算に焦点を当て、視覚情報を学習するAEにConvolutional Neural Network (CNN) モデルを導入してコップを把持する実験を行ったが、「コップ直径」「取手長さ」「取手角度」を独立して抽出できなかった。そこでVariational AE (VAE)を導入することで、深度画像情報およびロボットハンドのモータ角度情報から、「コップ直径」「取手長さ」といった、把持に必要な特徴量をより明確に抽出し、さらにコップの横や上に加えて取手を持つような把持姿勢を求めることができた。

最後に、実環境で4指16自由度のロボットハンド、深度カメラ、表面筋電位センサなどからなる、画像と筋電を併用した義手システムを構築した。市販の物体（ワイングラス13種、コップ8種、ペットボトル7種）について視覚-運動変換モデルを学習した後、健常者10名を対象とした把持実験から有用性を検証した。被験者自身の手で対象物を把持することを意識した手姿勢のときの筋電信号を使ってハンドでの把持を試みた場合74%，実験者が指定した典型的な手姿勢のときの筋電信号を使った場合90%で把持に成功した。

以上の結果より、筋電信号処理からロボットハンドを操作するシステムに、視覚-運動変換モデルを用いた画像処理を導入することで、把持目的と物体形状に応じて把持姿勢が計算でき、機能的な義手システムの実現の可能性を示した。

Date of Submission (month day, year) : September 25, 2025

Department of Computer Science and Engineering	Student ID Number	D173361	Supervisors	Naohiro Fukumura Shigeki Nakauchi
Applicant's name	Motoi Matsuda			

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	A Study on a Dexterous Prosthetic Hand System Utilizing Image and Myoelectric Signals
-----------------	---

Approx. 800 words

For individuals with upper limb absence, using a prosthetic hand that compensates for certain hand functions is essential for improving their quality of life. "Wearing comfort" and "weight" are among the key requirements for a prosthetic hand, and myoelectric prosthetic hands are particularly valued for their potential in terms of "grabbing, picking up, and holding," "independence," and "functionality." However, surface electromyography (EMG) signals are extremely weak, which has limited conventional myoelectric prosthetic hands to only a small set of predefined grasp types (e.g., power grasp, pinch, and so on).

On the other hand, in the field of object grasping with image-processing-based robotic hands, it is possible to extract not only the object type but also critical grasp-related information, such as shape, from images and compute multiple hand postures suitable for the target object. Nevertheless, the grasp posture is typically restricted to a single type for a given image input. In living spaces, many objects—such as cups—can be manipulated by multiple grasp types. In such cases, the appropriate grasp type must be selected based on the prosthetic user's intent among them.

This paper proposes a prosthetic hand system that enables users to perform natural grasp motor control for a variety of objects. The system leverages the strengths of both approaches: selecting the grasp type using myoelectric signals and computing the most suitable hand posture for the object's type, shape, and size through image processing.

The image processing component of the proposed system aims to compute diverse grasp postures by recognizing the shape and size of objects. To achieve this, I adopt a visuomotor transformation model that extracts the features that are necessary for grasping using multiple Auto-Encoders (AEs), inspired by human motor learning and control strategies, to compute grasp postures from images.

First, I conducted training and validation experiments in a real environment on the proposed model, using RGB images of two cylindrical objects placed at different positions as visual information and posture data of the robotic hand and arm during grasping as motor information. The model successfully disentangled object position and shape information from the images, confirming the effectiveness of the proposed method.

Next, focusing on hand posture computation, depth image information and a Convolutional Neural Network (CNN) model were introduced into visual feature learning process to enable the grasping of several cups. However, the model failed to disentangle features such as "cup diameter," "handle length," and "handle angle."

To address this problem, Variational AEs (VAEs) were incorporated into the model. As a result, the model was able to extract grasp-relevant features more clearly, such as "cup diameter" and "handle length," using depth image and the motor angles of the robotic hand. Furthermore, it was confirmed that the model could compute grasp postures in which the hand grasps the handle according to its length, in addition to grasping the top and side of the cup based on its diameter.

Finally, a myoelectric prosthetic hand system was constructed in a real environment, integrating image processing with a four-finger, 16-degree-of-freedom robotic hand, a depth camera, and surface EMG sensors. After training the visuomotor transformation model on a dataset of objects (thirteen types of wine glasses, eight types of cups, and seven types of plastic bottles), I evaluated its performance through grasping experiments with 10 able-bodied subjects. When participants attempted grasping using EMG signals corresponding to hand postures they intended for grasping objects naturally, the grasp success rate was 74%. when using EMG signals from a typical hand posture specified by the experimenter, subjects achieved the grasp success rate of 90%.

These results demonstrate that incorporating image processing based on a visuomotor transformation model into a robotic hand control system driven by myoelectric signals enables grasp postures to be computed according to both the intended grasping purpose and the object's shape, indicating the potential for developing a dexterous prosthetic hand system.