

外界センサレス動的物体操作手法の実験的検証

Experimental Verification of the Externally Sensorless Dynamic Object Manipulation

○ 河村 晃宏(九大) 田原 健二(九大) 丸田 圭悟(九大)
正 倉爪 亮(九大) 正 長谷川 勉(九大)

Akihiro KAWAMURA, Kyushu University, kawamura@irvs.is.kyushu-u.ac.jp
Kenji TAHARA, Kyushu University Keigo MARUTA, Kyushu University
Ryo KURAZUME, Kyushu University Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University

This paper presents an experimental verification of the externally sensorless dynamic object manipulation which has been proposed by us. This method enables robot to achieve stable object grasping and manipulation in dynamical sense without any external sensing. However, the effectiveness of the proposed method has been shown through only numerical simulations, so far. In this paper, a practical usefulness of the method is shown by an object manipulation experiment using a prototype. The prototype developed in this study has three fingers and each finger has 4 DOFs. By using this prototype, an experiment for stable object grasping with position and attitude control without any external sensing is conducted. Through this experimental result, the usefulness of our proposed method is demonstrated.

Key Words: Multi-Fingered Hand, Manipulation, Virtual Frame

1 緒言

多指ハンドシステムは、人の腕・手と似た構造から、人のような器用で柔軟な物体把持・操りが期待できる。よって、これらを用いた物体把持および操作手法に関する研究が多く行われてきた [1]。筆者らはこれまでに、多指ハンドシステムを用いた外界センサレス任意多面体形状の物体把持・姿勢操作手法を提案している [2,3]。本手法は、物体の形状や質量中心位置、指先接触点位置などの情報を必要としない。つまり、外界センサを一切用いることなく任意多面体の安定把持を実現する。外界センサによる情報の代わりとして、エンコーダなどによる内界センサ情報を用いた仮想的な物体位置・姿勢情報を利用することで、物体操作を実現している。しかし、本手法の有効性に関しては、数値シミュレーション上でのみ確認されており、実機による有効性については検証されていない。

本稿では、3本指ロボットハンドによる把持実験を行い、提案手法の有効性を実験によって検証する。本実験では、物体を安定に把持しながら、内界センサ情報を用いて仮想的に構築された把持物体の位置・姿勢の制御を行う。まず、システム全体の構成を示し、その後、内界センサ情報を用いた物体の仮想的な位置・姿勢を表す仮想フレームを定義する。次に、これまでに筆者らによって提案されている、物体把持・操作を行うための制御入力を示す。最後に、実験方法および結果を示し、本手法の実用面における有効性を示す。

2 システム構成

実験に用いるロボットハンドは4自由度の指を3本持ち、システム全体で12自由度を有する。各指先は柔軟で半球形状である。本ロボットハンドの全体図を図1、指1本のリンク構造を図2に、各パラメータを表1に示す。また、本ハンドで使用したモータとギヤヘッド、エンコーダの主な仕様を表2に示す。 i 番目の指の関節角を $q_i = (q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, q_{i4})^T \in \mathbb{R}^4$ と表し、ロボットハンド全体の関節

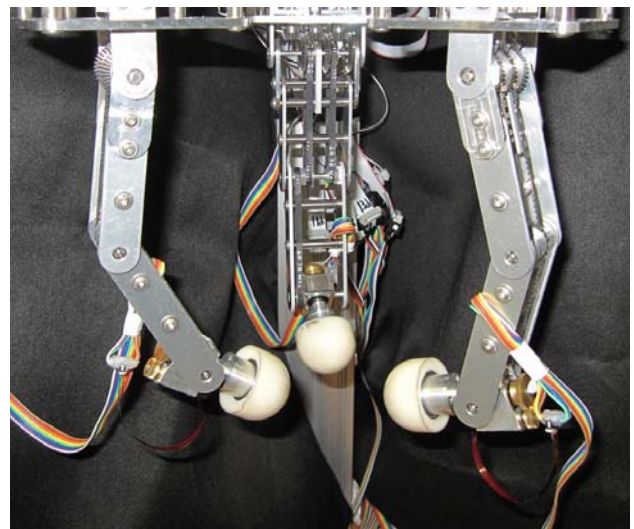


Fig.1 Triple fingered robotic hand

角ベクトルである q は、 $(q = (q_1^T, q_2^T, q_3^T)^T)$ と表す。また、指先半球中心位置を $x_i \in \mathbb{R}^3$ と表し、指先半球中心における指先姿勢を以下のような回転行列 R_{fi} で表す。

$$R_{fi} = (r_{x_{fi}}, r_{y_{fi}}, r_{z_{fi}}) \in SO(3), \quad (1)$$

ここで、 $r_{x_{fi}}, r_{y_{fi}}, r_{z_{fi}} \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ、慣性座標系からみた指先座標系の x 軸、 y 軸、 z 軸を示す単位ベクトルである。

3 仮想フレーム

本実験では、実際の物体の位置・姿勢情報の代わりとして、ロボットハンドの各関節角度で表された仮想フレーム

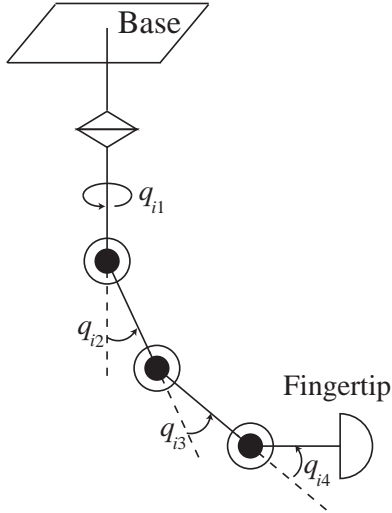


Fig.2 Link structure

Table 1 Physical parameters

Triple-fingered hand-arm system	
1 st link length l_{i1}	0.064[m]
2 nd link length l_{i2}	0.064[m]
3 rd link length l_{i3}	0.030[m]
1 st mass center l_{gi1}	0.023[m]
2 nd mass center l_{gi2}	0.035[m]
3 rd mass center l_{gi3}	0.010[m]
1 st mass m_{i1}	0.038[kg]
2 nd mass m_{i2}	0.024[kg]
3 rd mass m_{i3}	0.054[kg]
(Finger tip)	
Radius r_i	0.015[m]
Physical properties s_i	2.390×10^6 [N/m ²]

Table 2 Specification of the actuators

Motor Type	DC
Maximum speed [rpm]	9550
Maximum torque [Nm]	257
Reduction	5.4 : 1
Resolution [deg]	0.0167

を用いて把持物体の操作を行う。以下、仮想的な位置・姿勢を表す仮想フレームを定義する。まず、仮想フレームの位置 x_c をロボットの各指先位置より以下のように定める (図 3 参照)。

$$x_c = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 x_i \quad (2)$$

仮想位置 x_c を原点とした仮想フレームを、ロボットの各指先姿勢から決定される以下のような回転行列 R_{vir} で表す

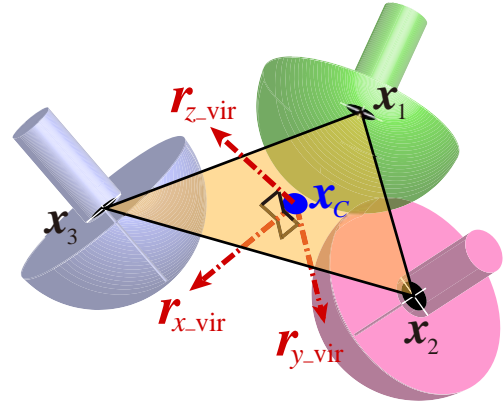


Fig.3 Virtual frame

(図 3 参照)。

$$R_{vir} = (r_{x_{vir}}, r_{y_{vir}}, r_{z_{vir}}) \quad (3)$$

$$r_{x_{vir}} = \frac{\tilde{r}_{x_{vir}}}{\|\tilde{r}_{x_{vir}}\|}, \quad \left(\tilde{r}_{x_{vir}} = \sum_{i=1}^3 r_{x_{fi}} \right) \quad (4)$$

$$r_{y_{vir}} = \frac{\tilde{r}_{x_{vir}} \times \tilde{r}_{y_{vir}}}{\|\tilde{r}_{x_{vir}} \times \tilde{r}_{y_{vir}}\|}, \quad \left(\tilde{r}_{y_{vir}} = \sum_{i=1}^3 r_{y_{fi}} \right) \quad (5)$$

$$r_{z_{vir}} = r_{x_{vir}} \times r_{y_{vir}} \quad (6)$$

これら仮想フレームの位置・姿勢を把持物体の仮想的な位置・姿勢として操作する。

4 制御入力

本実験では物体の安定把持に関する制御入力項 u_s , 把持物体の位置制御入力項 u_p , 把持物体の姿勢制御入力項 u_o を線形結合することでロボットハンドに対する制御入力 u を計算する。以下に各入力項の詳細を示す。

4.1 物体安定把持制御入力項 u_s

物体の安定把持を行うための制御入力 u_s を示す [2]。

$$u_s = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^3 r_i} \sum_{j=1}^3 J_{0j}^T (x_c - x_j) - C\dot{q} + G \quad (7)$$

ただし、 f_d は目標把持力、 r_i は指先半球の半径、 $C \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)} > 0$ は関節粘性係数を表す正定対角行列である。また、 J_{0j} は指先中心における並進速度ベクトル \dot{x}_i の関節角 q に関するヤコビ行列である。

一方、筆者らの先行研究において [2]、これまで重力は考慮されていなかった。しかし、実験において、特にロボットハンドに影響する重力項を無視することはできないため、本実験で用いる制御入力 (7) には重力補償項 G を追加している。この G はロボットハンドに関する重力補償のみを行い、把持物体に関する重力については、物体質量が十分に小さいとしているため、考慮していない。本制御入力は各指先が、各指先半球中心位置を頂点として構成される仮想的な三角形の幾何中心へ向かうような制御を行う。

Table 3 Details of the grasped object

Mass m	0.0015[kg]
Material (Figure)	Styrene foam
Length of side of triangle	0.060[m]
Height	0.039[m]

Table 4 Desired grasping force and gains

f_d	1.0[N]
C_1, C_2, C_3, C_4	$\text{diag}(4.0, 4.0, 4.0, 4.0) \times 10^{-3} [\text{Ns}\cdot\text{m}/\text{rad}]$
K_p	200.0

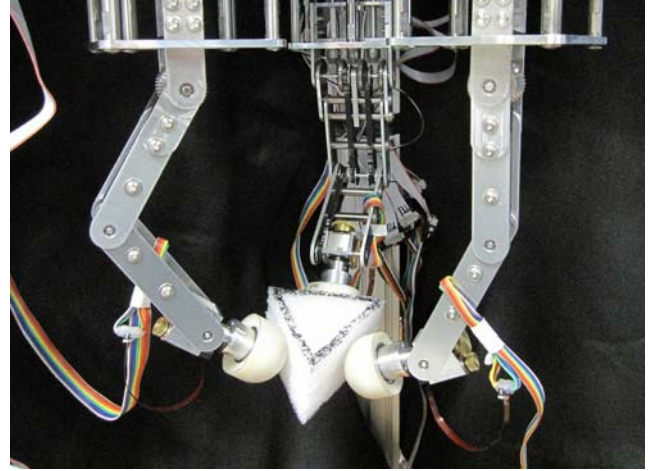


Fig.4 Stable grasping of the triangular prism

4.2 把持物体位置制御入力項 u_p

把持物体の位置制御のための制御入力 u_p を以下に示す．

$$u_p = K_p \sum_{j=1}^3 J_{0j}^T (x_d - x_c). \quad (8)$$

ただし, K_p は正のスカラー量であり, x_d は目標位置である．

4.3 把持物体姿勢制御入力項 u_o

把持物体の姿勢制御のための制御入力 u_o を以下に示す [3]．

$$u_o = K_o \sum_{j=1}^3 J_{\Omega j}^T \{ (r_{x_{\text{vir}}} \times r_{x_d}) + (r_{y_{\text{vir}}} \times r_{y_d}) + (r_{z_{\text{vir}}} \times r_{z_d}) \} \quad (9)$$

ただし, K_o は正のスカラー量であり, 物体の目標姿勢は $R_d = (r_{x_d}, r_{y_d}, r_{z_d})$, $J_{\Omega j}$ は指先中心における指の姿勢角速度ベクトル ω の関節角 q に関するヤコビ行列である．このとき, $r_{x_{\text{vir}}} \times r_{x_d}$ は $r_{x_{\text{vir}}}$ が r_{x_d} に向かうような回転モーメントを発生させる瞬間回転軸ベクトルを表しており, y 成分, z 成分についても同様である．これら3つのベクトルの合ベクトルを瞬間回転中心として把持物体に回転モーメントを与えることにより, 把持物体が目標姿勢へ近づくことになる．

5 実機実験

図1で示したロボットハンドを用いて, 実機実験を行い, 筆者らが提案している手法の有効性を確認する．本実験では, 以下の2つの実験を行う．

1. 把持物体の位置制御実験
2. 把持物体の姿勢制御実験

対象物体は正三角柱とし, 詳細を表3に示す．本実験では, 把持物体を非常に軽量のポリスチレン製とする．よって, 把

持物体の質量が十分に小さい環境であるため, 把持物体の重力に関する補償は行っていない．また, どちらの実験においても, 図4のように物体安定把持制御入力項 $u_s(7)$ を用いて対象物体を安定に把持した状態を初期状態として実験を行う．

5.1 1. 位置制御実験

本実験では, 物体安定把持制御入力項 $u_s(7)$ および把持物体位置制御入力項 $u_p(8)$ を用いて三角柱の位置制御実験を行う．すなわち, ロボットハンドに与える制御入力 u は以下ようになる．

$$u = u_s + u_p \quad (10)$$

このときの制御入力内の各パラメータ値を表4に示す．また, 目標位置 x_d を以下のように与える．

$$\begin{aligned} 0[\text{s}] \sim 2[\text{s}] : x_d &= x_{\text{ini}} \\ 2[\text{s}] \sim 4[\text{s}] : x_d &= x_{\text{ini}} + (0.02, 0.00, 0.00)^T \\ 4[\text{s}] \sim 8[\text{s}] : x_d &= x_{\text{ini}} \end{aligned}$$

ただし, x_{ini} は仮想フレームの初期位置を示す．このときの仮想フレームの位置 x_c の時系列データを図5に示す．図5より, 仮想フレームの位置が目標値に収束していることがわかる．

5.2 2. 姿勢制御実験

本実験では, 物体安定把持制御入力項 $u_s(7)$ および把持物体姿勢制御入力項 $u_o(8)$ を用いて三角柱の姿勢制御実験を行う．この場合, ロボットハンドに与える制御入力 u は以下ようになる．

$$u = u_s + u_o \quad (11)$$

制御入力内の各パラメータ値を表5に示す．また, 目標姿勢 R_d を以下のように与える．

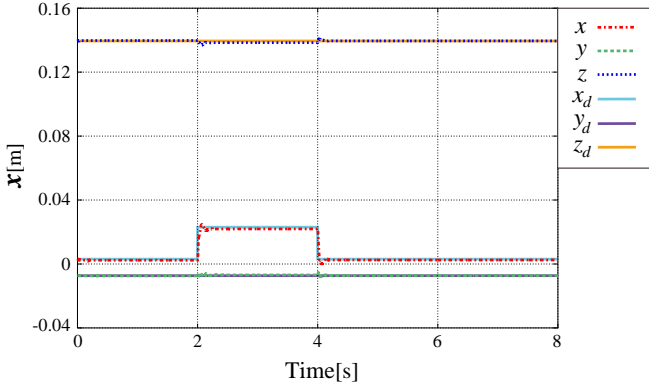


Fig.5 Transient response of x_c

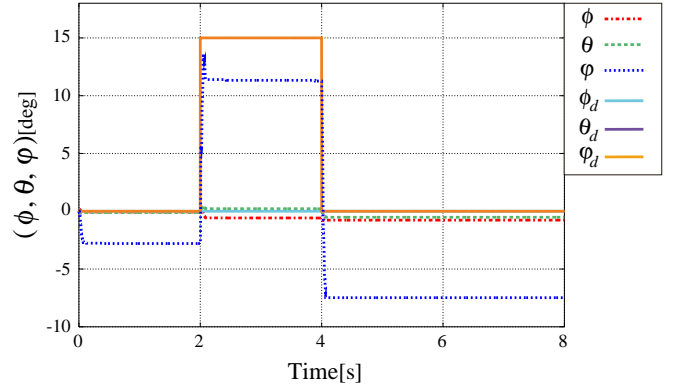


Fig.6 Transient response of the object attitude in Euler angle representation

Table 5 Desired grasping force and gains

f_d	0.8[N]
C_1, C_2, C_3, C_4	$\text{diag}(4.0, 5.0, 4.0, 2.0) \times 10^{-3} [\text{Ns}\cdot\text{m}/\text{rad}]$
K_o	0.007

$$0[\text{s}] \sim 2[\text{s}] : \mathbf{R}_d = \mathbf{R}_{\text{ini}}$$

$$2[\text{s}] \sim 4[\text{s}] : \mathbf{R}_d = \mathbf{R}_{\text{ini}} \mathbf{R}_{rd}$$

$$4[\text{s}] \sim 8[\text{s}] : \mathbf{R}_d = \mathbf{R}_{\text{ini}}$$

ただし、 \mathbf{R}_{ini} は仮想フレームの初期姿勢を示しており、 \mathbf{R}_{rd} は以下の式を満たす。

$$\mathbf{R}_{rd} = (\phi_d, \theta_d, \psi_d) = \left(0, 0, \frac{1}{12}\pi\right) \quad (12)$$

式(12)中の ϕ_d, θ_d, ψ_d は、 \mathbf{R}_{rd} をオイラー角によって表した場合の各変数を表している。すなわち、2[s]～4[s]のとき、初期姿勢 \mathbf{R}_{ini} の z 軸に関して、 $\frac{1}{12}\pi$ 回転させた姿勢を目標姿勢とする。また、仮想フレームの初期姿勢に対する相対姿勢を \mathbf{R}_r とすると、以下の式が成立する。

$$\mathbf{R}_{\text{vir}} = \mathbf{R}_{\text{ini}} \mathbf{R}_r \quad (13)$$

この式より、以下の式が得られる。

$$\mathbf{R}_r = \mathbf{R}_{\text{ini}}^T \mathbf{R}_{\text{vir}} = (\phi, \theta, \psi) \quad (14)$$

このとき、 $\mathbf{R}_r = \mathbf{R}_{rd}$ であれば、 $\mathbf{R}_{\text{vir}} = \mathbf{R}_d$ がいえる。姿勢制御実験の結果を \mathbf{R}_r を用いて図6に示す。図6から、式(11)で表される制御入力を用いることで、目標姿勢へ収束する方向へ仮想フレームが回転していることがわかる。しかし、完全に目標姿勢へは収束せず、目標値 \mathbf{R}_{rd} との間に偏差が残っていることが確認できる。特に、仮想フレームの z 軸周りにおいて、誤差が最大となっている。この誤差は、柔軟指の剪断方向の変形や重力の影響によるものと考えられる。また、他にもシステムの自由度が仮想フレームの z 軸周りに把持物体を回転させるためのトルクを発生させ難い構成となっている可能性もあり、今後詳細に検討を行う予定である。しかし、全体として概ね目標へ近づいており、また、外界センサレス手法であることから、正確な物体操作

は目的としていないため、これらは十分な許容誤差範囲内である。

また、位置制御実験および姿勢制御実験共に、実際の把持物体・操作中において、特に不安定な挙動に陥ることなく安定把持が維持されることを確認した。

6 結言

筆者らがこれまでに提案している、外界センサレス任意多面体把持手法および把持物体の姿勢制御手法の実験的検証を行った。まず、システム構成を示し、実際の把持物体の位置・姿勢の代わりに操作対象である仮想フレームの構築法を示した。その後、提案手法の制御入力を示し、実機を用いた実験を行った。実験結果から、提案手法を用いることで、外界センサレスによる物体把持および位置・姿勢制御が実現できることを確認した。

文献

- [1] A. Bicchi, "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road towards simplicity," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 16, no. 6, pp. 652–662, 2000.
- [2] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Dynamic grasping for an arbitrary polyhedral object by a multi-fingered hand-arm system," *Proc. of the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2264–2270, St. Louis, USA, 2009.
- [3] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Dexterous object manipulation by a human-like hand-arm system with unified controller," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomim.*, pp. 1542–1548, Tianjin, China, 2010.