

柔軟3指の配置が把持対象物の姿勢角制御に与える影響

上本宏明(立命館大) 平井慎一(立命館大)

How Arrangement of Three Soft Fingered Hand Affects Posture Control of Grasped Object

*Hiroaki UEMOTO (Ritsumeikan University), Shinichi HIRAI (Ritsumeikan University)

Abstract— This article focuses on the arrangement of a robotic hand consisting of three fingers with soft fingertips. Soft fingertips have various features, for example, the touch area of soft fingertips is wider than that of hard fingertips. The ability of posture control strongly depends on the arrangement of the three fingers. Here we experimentally investigate how the arrangement affects the posture control.

Key Words: Flexible Robot, Robot Hand

1. 緒言

柔軟指は剛体指と比べて物体を安定に把持，操作できることが知られている．柔軟指はその変形によって把持対象物と面接触することができ，また柔軟指ハンドで把持された物体は，環境と接触するなどして外力を受けても，指先が把持対象物から間接的に接触力を受けて変形することで面接触状態を維持し，物体を把持し続けられる．他にも，柔軟指ハンドは剛体指ほど高精度な制御を必要としないという特徴がある．剛体指で物体を把持する場合，精密な力制御をしなければ，把持できないか，もしくは把持対象物やハンドを破壊してしまう恐れがある．しかし柔軟指ハンドであれば，指先の変形によって多少の誤差なら吸収することが期待できるため，より単純な制御でも，物体の把持，操作が可能であると考えられる．また井上らは，指先変形によるポテンシャルエネルギー極小値の概念 (LMEE: Local minimum of elastic potential energy) を提唱し，把持対象物の位置と姿勢が準静的な条件のもとで一意に求まることを証明している^[1]．先行研究ではこれらの特徴に着目し，柔軟な指先を取り付けた3本指のロボットハンドを設計，製作して，このハンドで把持した物体の姿勢変化について検証した．そのために，把持対象物に取り付けたマーカをCCDカメラで撮影し画像処理することで姿勢計測を行い，その情報をハンドの制御にフィードバックした．これにより，1自由度3指のロボットハンドの場合，指先が剛体であれば把持対象物に与える把持力のみが制御できるが，柔軟3指は指先の変形によって，把持対象物における2方向の姿勢角が制御可能であることが確認できた．今回は，把持対象物に対する3指の配置を変更することで，姿勢角制御にどのような影響があるかを検証する．

2. システム

2.1 柔軟3指ハンド

本研究で用いる柔軟3指ハンドをFig.1に示す．各指のリンク長は126[mm]であり，指同士のなす角度は15[deg]刻みで変更可能となっている．また各指の根元から，それらを固定している台の中心までの水平距離はどれも110[mm]である．ハンドの各指にはDCモータで駆動する関節が1つずつあり，合計3自由度となっ

ている．それぞれのDCモータにはエンコーダが取り付けられており，これによって各指の関節角情報を取得している．指先に取り付けた柔軟部材はポリウレタン製で半径が20[mm]の半球形状をしており，この指先で把持対象物である三角柱を把持，操作する．この柔軟部材は，エクシールコーポレーション製の硬度15の人肌ゲルを，半球状の型に流し込んで作成している．

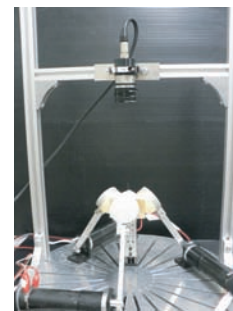


Fig.1 Three-fingered hand with soft fingertips

2.2 把持対象物の姿勢角測定

本研究では，把持対象物である三角柱の上面に2種類のマーカを取り付け，これをCCDカメラで真上から撮影し画像処理することで姿勢計測を行っている．本研究では把持した物体の姿勢角情報を計測してハンドの制御にフィードバックする必要がある．把持対象物にジャイロセンサを取り付けるなどの計測方法に比べて，ビジュアルフィードバックでは物体の姿勢角を非接触で計測することができ，またセンサの配線も不要であるため，把持対象物に対する外力の影響を考慮する必要がないという利点がある．CCDカメラで撮影された入力画像と画像処理結果をFig.2に示す．2種類のマーカは色抽出によって区別され，別々に処理が行われる．マーカ1は三角柱の上面中央から垂直に立てられた黒色の棒であり，画像処理によってこのマーカ1の根元と先端の画像上における座標を取得することによって，把持対象物の2方向の姿勢角が以下のように求められる．

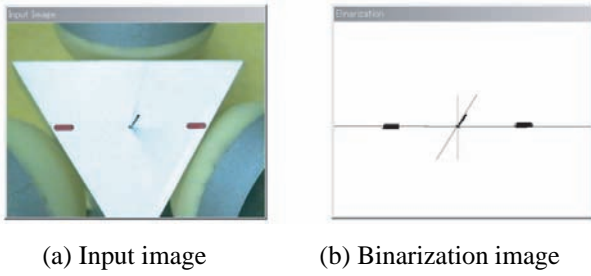


Fig.2 Input image and binarization image

$$\theta_{ang} = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}}{L} \right) \quad (1)$$

$$\theta_{dir} = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) \quad (2)$$

式(1), (2)における (x_0, y_0) は画像上におけるマーカ1の根元座標, (x_1, y_1) はマーカ1の先端座標, L はマーカ1の元の長さである. また θ_{ang} は把持対象物の傾く角度, θ_{dir} は把持対象物の傾く方向を表しており, この2つの姿勢角を Fig.3 に示す. 一方のマーカ2はマーカ1の両脇に描かれた2本の赤色の線分であり, この2本の線分の中点の座標がマーカ1の根元座標と重なることから, マーカ1の端点のどちらが根元座標かを判別するために使われる.

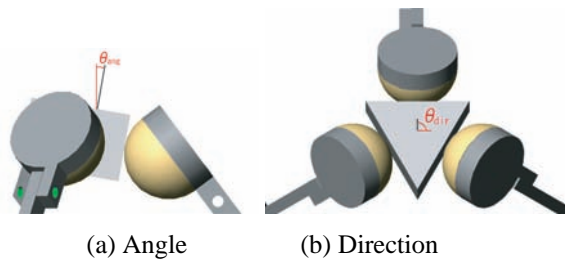


Fig.3 Posture of grasped object

2.3 姿勢積分制御手法

今回の柔軟3指ハンドの制御には, 姿勢積分制御手法を使用する. これは先の柔軟2指ハンドの研究[2]で考案された制御則である. この制御手法では, 初期把持状態からハンドの各指の関節角を操作したときに, 把持対象物の姿勢角がどのように変化するかという幾何関係をもとに, 制御則が非常に簡単な形で表されるようになっていく. 柔軟3指ハンドの物体操作における各指の関節角と把持対象物の姿勢角変化の幾何関係を Fig.4 に示す. Fig.4において, 把持対象物からみて CCD カメラ上の x 軸に対し $90[\text{deg}]$ の方向にある指を第1指, $210[\text{deg}]$ の方向の指を第2指, $330[\text{deg}]$ の方向の指を第3指とする. Fig.4(a), (b), (c), (d)における赤い矢印はハンドの各指を傾ける方向を示し, 青い矢印はハンドの操作によって結果的に把持対象物が傾く方向を示している. これらの操作では, 各指を傾ける量を大

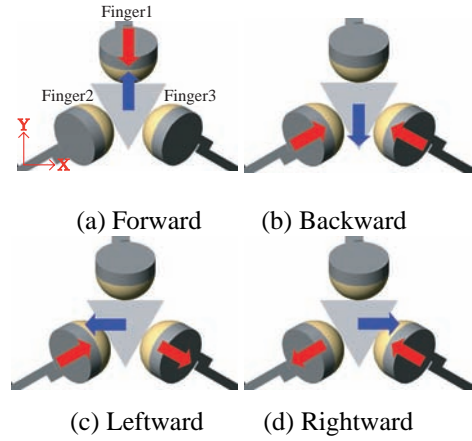


Fig.4 Geometric relationship

きくれば, 把持対象物の姿勢変化も大きくなる. このように, 各指の関節角を操作することで, 把持対象物を任意の方向に任意の角度だけ傾けることができるということがわかる. また姿勢積分制御手法は, 制御対象となる物体の姿勢角偏差の積分値を柔軟指ハンドにおける各指の目標関節角決定に用いている. 物体姿勢角の積分値を各指の目標関節角生成に用いることで, 実際の関節角が目標値に対して定常偏差を残したままでも, 把持対象物の姿勢角を目標値に収束させることができる. Fig.4で示した幾何関係を考慮し, 今回の柔軟3指ハンドの制御に用いる制御則を以下に示す.

$$\tau_i = -K_P(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D\dot{\theta}_{fi} + f_{const} \quad (3)$$

$$\theta_{fi}^d = K_I \int (p_i - p_i^d) dt \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_1 = \sin \theta_{ang} \cos(\theta_{dir} - 90) \\ p_2 = \sin \theta_{ang} \cos(\theta_{dir} - 210) \\ p_3 = \sin \theta_{ang} \cos(\theta_{dir} - 330) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_1^d = \sin \theta_{ang}^d \cos(\theta_{dir}^d - 90) \\ p_2^d = \sin \theta_{ang}^d \cos(\theta_{dir}^d - 210) \\ p_3^d = \sin \theta_{ang}^d \cos(\theta_{dir}^d - 330) \end{cases} \quad (6)$$

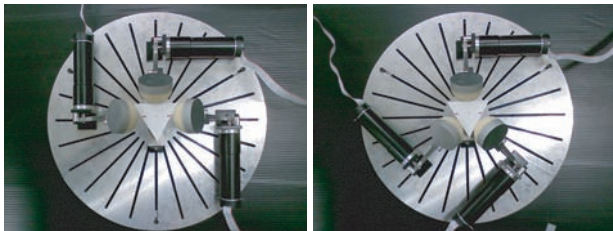
式(3)における τ_i は第 i 指トルク, θ_{fi} は第 i 指のエンコーダによる関節角測定値, θ_{fi}^d は第 i 指の目標関節角であり, また f_{const} は物体に対する把持力を維持するための定数トルクである. これは把持対象物の姿勢角が目標値に収束した後に, 各指への指令トルクが生成できなくなることを防ぐためのものである. また式(4)は姿勢積分制御手法における目標関節角を生成する積分制御器である. 式(5), (6)における p_i と p_i^d では, Fig.4で示した幾何関係とカメラ画像から取得した θ_{ang} , θ_{dir} を用いて, 各指に与える目標関節角を計算している.

3. 実機実験

先行研究では、今回製作した柔軟3指ハンドと姿勢積分制御手法を用いて、把持対象物の傾く角度と傾く方向という2つの姿勢角を独立に制御できることを示した。今回は、把持対象物に対する3指の配置を変更することで、姿勢角制御にどのような影響があるかを検証する。Fig.5に今回の実験で検証するハンド各指の配置を示す。またTable 1に、Fig.5のそれぞれの配置において、把持対象物からみた各指がCCDカメラ上のx軸に対してどの方向に配置されているかを示す。またFig.5(b),(c)の配置においては、制御則の式(5),(6)中の値をTable 1の値と対応するよう変更している。



(a) Arrangement 1



(b) Arrangement 2

(c) Arrangement 3

Fig.5 Arrangements of experiment

Table 1 Parameters of experiment

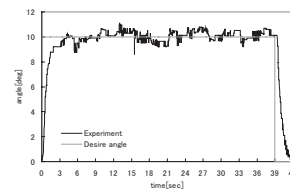
Number	Finger1[deg]	Finger2[deg]	Finger3[deg]
1	90	210	330
2	90	180	360
3	90	225	315

次に、Fig.5における各指の3種類の配置で、それぞれ把持対象物の姿勢角を制御する実験を行った。Table 2に本実験における物体姿勢角の目標値を、またFig.6に実験結果における把持対象物の傾く角度の測定値を示す。Fig.6(a),(b),(c)の実験結果はそれぞれFig.5(a),(b),(c)における各指の配置と対応している。Fig.6(a)では把持対象物の傾く方向が変化しても、傾く角度は常に目標値に収束している。しかしFig.6(b)では傾く方向が90[deg]付近と270[deg]付近では傾く角度は目標値に届かず、またFig.6(c)では傾く方向が0[deg]付近と180[deg]付近では傾く角度が目標値に届いていない。これはFig.5(a)では各指が把持対象物からみて120[deg]毎に等間隔に配置されているのに対して、Fig.5(b)ではCCDカメラ上のx軸方向に、またFig.5(c)ではy軸方

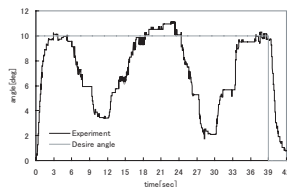
Table 2 Desire angle and direction of the experiment

time[sec]	θ_{ang}^d [deg]	θ_{dir}^d [deg]
0-3	10	0
3-6	10	30
6-9	10	60
9-12	10	90
12-15	10	120
15-18	10	150
18-21	10	180
21-24	10	210
24-27	10	240
27-30	10	270
30-33	10	300
33-36	10	330
36-39	10	360
39-42	0	360

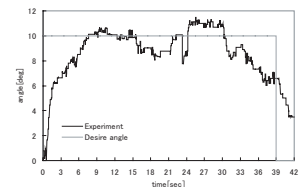
向に各指の配置が偏っているため、構造的に把持対象物を傾けにくい方向ができたためと考えられる。



(a) Arrangement 1



(b) Arrangement 2



(c) Arrangement 3

Fig.6 Experimental result

4. 結言

本報告では柔軟な指先を有する3本指のロボットハンドにおいて、ビジュアルフィードバックを用いた姿勢積分制御手法によって、把持対象物の2方向の姿勢角を独立に制御し、各指の配置が物体操作にどのような影響が出るかを実機実験によって検証した。

参考文献

- [1] 井上貴浩, 平井慎一: “ロボットハンドによる把持・操り動作を実現する半球型ソフトフィンガの幾何学的・材料学的非線形性を考慮した弾性力モデル”, 日本ロボット学会誌, 25, 2, pp.221-230, 2007.
- [2] 井上貴浩, 平井慎一: “力制御入力が必要としない把持対象物姿勢積分制御手法の提案”, 日本ロボット学会学術講演会, 2007.