

多関節多指ハンドとロボットアームの協調動作計画手法

九州大学 福田 雅広 村上 剛司 長谷川 勉 倉爪 亮

Planning of coordinated motion of robotic arm and multi-fingered hand

Masahiro Fukuda, Kouji Murakami, Tsutomu Hasegawa and Ryo Kurazume
Kyushu University

Abstract— This paper presents a method to plan coordinated motion of a multi-fingered hand and a robotic arm. Manipulation in a limited space cluttered with obstacles can be accomplished by the coordinated motion. We formulate the method and simulate an opening task of a cap of bottle. Simulation results show effectiveness.

Key Words: multi-fingered hand, robotic arm

1. はじめに

人間は2本の腕を用いて作業を行なう。対象が置かれていた場所ではなく、作業しやすい場所を選び、一方の腕で対象物を固定把持し、他方の腕が操作を行なうことや、両腕を同時に協調的に動かして、対象物を大きく操作することなどができる。しかし、ロボットアームを2本用意したとしても、人間のような器用な作業動作を実現するのは容易でない。ロボットアームは関節数や配置、さらにリンク長など人間の腕とは構造が異なるうえ、双腕アームは多数の関節がある冗長系だからである。

またアームの先端に多指ハンドを装着すれば、物体を把持するだけでなく指で操作もできる。これにより、障害物が多くアームの動作に制約がある環境でも、作業を実行できるようにもなる。しかし制御すべき関節数はさらに増える。多指ハンドと双腕アームの全ての関節角度をフルに活用して器用な作業を行なう方法はいまだ確立されていない。

本研究では、多指ハンドを有する双腕アームの関節の同時協調制御を可能にするため、まず運動学の定式化を行なう。これに基づき、作業場所や初期コンフィギュレーションを探索し、器用な作業の実行を図る。ペットボトルのふた開け作業を例題として、シミュレーションを行ない、動作を確認する。

2. 協調動作計画手法

2.1 運動学

アーム(または指)先端の速度 \dot{r} と関節角速度 $\dot{\theta}$ との関係は、ヤコビ行列 J を用いて以下のように表される。

$$\dot{r} = J\dot{\theta} \quad (1)$$

この式の一般解は擬似逆行列 $J^\#$ を用いて

$$\dot{\theta} = J^\# \dot{r} + (I - J^\# J)y \quad (2)$$

となる。ここで、 I は単位行列、 y は任意のベクトルである。後述の計算では、 $y = 0$ とし、アーム先端の目標速度を満たす解のうち、すべての関節角速度二乗和を最小化するものを求めることとする。

2.2 双腕の協調

アーム先端の速度を並進速度と回転角速度に分けると、右腕と左腕のヤコビの関係式はそれぞれ

$$\begin{pmatrix} v_R \\ w_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{vR} \\ J_{wR} \end{pmatrix} \dot{\theta}_R, \quad \begin{pmatrix} v_L \\ w_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{vL} \\ J_{wL} \end{pmatrix} \dot{\theta}_L \quad (3)$$

と表される。

ここで、右腕と左腕でペットボトルをその中心軸に対して反対方向に回すとする。このとき、右腕と左腕のペットボトルの軸に対する相対角速度を $\Omega = w_R - w_L$ とおくと、式(3)より

$$\begin{pmatrix} v_R \\ v_L \\ \Omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{vR} \dot{\theta}_R \\ J_{vL} \dot{\theta}_L \\ J_{wR} \dot{\theta}_R - J_{wL} \dot{\theta}_L \end{pmatrix} \quad (4)$$
$$= \begin{pmatrix} J_{vR} & 0 \\ 0 & J_{vL} \\ J_{wR} & -J_{wL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{pmatrix}$$

となる。ここで、式(4)の左辺を \dot{r} 、右辺を $J\dot{\theta}$ と置き換えると、式(1)と同形になる。これにより、双腕のすべての関節角速度二乗和を最小化する解を計算できる。

2.3 多指ハンドとアームの協調

指先の転がり接触 [1] を用いて多指ハンドによる物体操作を行なう。転がり接触では、各指について、物体表面上の接触点の移動速度と指先表面上の接触点の移動速度が等しくなるように制御する。指先接触点の移動速度 v_{c_i} と指の関節角速度 \dot{q}_i の関係は、

$$v_{c_i} = \tilde{J}_i \dot{q}_i \quad (5)$$

と表される。ここで、 \tilde{J}_i は i 番目の指の接触点でのヤコビ行列である。

式(5)をアーム部と指部に分けると、次のように書き表される。

$$v_{c_i} = \begin{pmatrix} \tilde{J}_{arm} & \tilde{J}_{ifinger} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_{arm} \\ \dot{q}_{ifinger} \end{pmatrix} \quad (6)$$

このとき、

$$\tilde{J}_i = \begin{pmatrix} \tilde{J}_{arm} & \tilde{J}_{ifinger} \end{pmatrix}, \quad \dot{q}_i = \begin{pmatrix} \dot{q}_{arm} \\ \dot{q}_{ifinger} \end{pmatrix}$$

ハンドはアーム先端に装着されているため、式(6)のアーム部の関節角速度はすべて等しい。従って、指の本数を m 本として $v_c \triangleq (v_{c_1} \dots v_{c_m})$ とおくと、

$$v_c = \begin{pmatrix} \tilde{J}_{arm} & \tilde{J}_{fingers} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_{arm} \\ \dot{q}_{fingers} \end{pmatrix} = \tilde{J}_{ex} \dot{q}_{ex} \quad (7)$$

ただし,

$$\tilde{J}_{ex} \triangleq \begin{pmatrix} \tilde{J}_{arm} & \tilde{J}_{fingers} \end{pmatrix}, \dot{q}_{ex} \triangleq \begin{pmatrix} \dot{q}_{arm} \\ \dot{q}_{fingers} \end{pmatrix}$$

$$\tilde{J}_{fingers} \triangleq \text{block diag}(\tilde{J}_{1finger}, \dots, \tilde{J}_{mfinger})$$

$$\tilde{J}_{arm} \triangleq \begin{pmatrix} \tilde{J}_{arm} \\ \dots \\ \tilde{J}_{arm} \end{pmatrix}, \dot{q}_{fingers} \triangleq \begin{pmatrix} \dot{q}_{1finger} \\ \dots \\ \dot{q}_{mfinger} \end{pmatrix}$$

式 (7) を用いることで, 多指ハンドとアームが協調した, 転がり接触による物体操作が可能となる. 式 (7) を式 (2) に代入すると, アームと指のすべての関節角速度二乗和を最小化する解を求めることができる.

3. シミュレーション

家庭内作業の典型的な例としてペットボトルのふた開け作業を選び, そのシミュレーションを行なった. 用いた双腕ロボットのモデルを Fig.1 に示す. このロボットは7関節アームと3関節3本指ハンドを有する. またペットボトルのサイズは, ボトル部分が直径 80mm, 高さ 220mm であり, ふたは直径 40mm, 高さ 20mm である.

ペットボトルの位置・姿勢の選び方により, ふたの開け易さは異なる. そこで, ふたを一度で大きく回すことができ, 持ち替えの回数を減らせる位置・姿勢を探索した. 得られた初期姿勢を Fig.2 に示す.

シミュレータへの入力は, ふたの回転角度のみである. 回転角度が入力されると, 2. で説明した手法で動作を生成する.

双腕の協調実験: 入力を 90° として, 双腕のアーム部を協調させて実行した結果を Fig.3 に示す. ここでは, ハンド部はグリッパのように物体の把持だけに用いた. 単腕だけで 90° 回すことは難しいが, 双腕を協調させたことで作業を達成できた.

多指ハンドとアームの協調実験: 入力を 60°, 左腕を固定として, 右腕だけで実行する. ロボットが作業時に占有する空間を作業空間と呼ぶ. Fig.4(a) に, アーム部だけで実行したときの作業空間を示す. ここではハンド部は物体の把持だけに用いた. Fig.4(b) に, 多指ハンドによる操作とアームの動きを協調させて実行したときの作業空間を示す. Fig.4(a) では肘の位置と手首の位置がそれぞれ 113mm, 121mm 移動しているのに対して, Fig.4(b) ではそれぞれ 13mm, 14mm である. 多指ハンドとアームが協調することで作業空間を小さくできた. これは, 周囲が障害物に囲まれてアームの動きに制約がある環境でも作業を実行できることを示している.

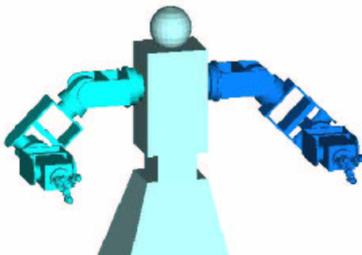


Fig.1 Robot with dual 7-DOF arms having three-fingered hand.

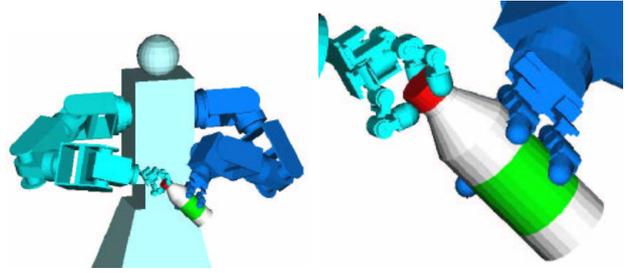


Fig.2 Initial configuration for turning a cap of bottle.

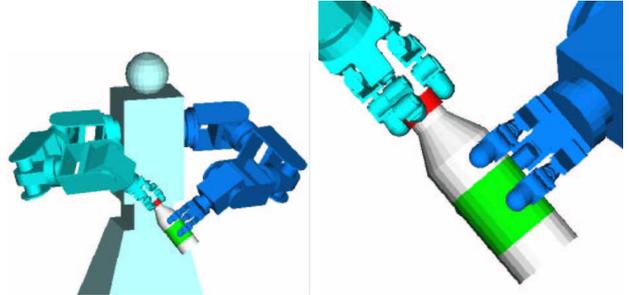
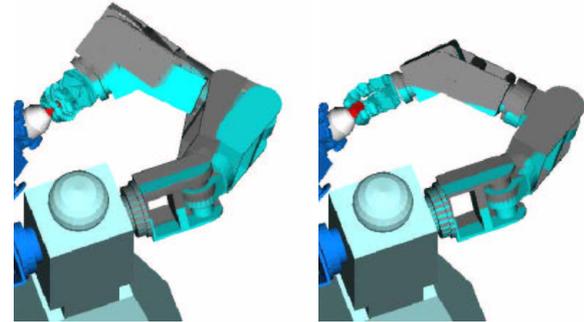


Fig.3 Terminal configuration for turning a cap of bottle by coordinated motion of dual arm.



(a) Arm only (b) Arm and multi-fingered hand

Fig.4 Swept volume of the arm turning a cap.

4. まとめ

本論文では, 多指ハンドつき双腕マニピュレータを対象として, 各部の関節角度を同時協調制御するための運動学定式化を行なった. 双腕の協調動作計画手法と, 多指ハンドとアームの協調動作計画手法について述べた. またペットボトルのふた開け作業を例題としてシミュレーションを行ない, 動作を確認した.

今後の課題は, 複雑な環境にも対応できるようにするために, 双腕アームや多指ハンドのどの部位をより動かすかなどの操作条件を自由に設定できるようにすることである.

参考文献

- [1] 長谷川 勉, 松岡 毅, 桐木 利弘, 本田 久平, “複数センサを用いた多関節多指ハンドによる物体操作”, 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, No.1, pp. 487-488, 1995
- [2] 吉田 和哉, 倉爪 亮, 梅谷 陽二, “宇宙ロボットの多腕協調制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp. 718-726, 1991