

ハンドとアームの協調動作のための目標値の生成

○岸本 純一 細田 耕 浅田 稔
大阪大学工学部

Trajectory Generation for Hand-Arm Cooperation

○Jun-ichi KISHIMOTO Koh HOSODA Minoru ASADA
Osaka University

1 はじめに

近年、ロボットシステムに要求されるタスクが高度で複雑なものとなりつつある。このようなタスクを効率的に実現するために、運動学的、動力学的に性質の異なるものを用いてシステムを構成することが考えられる。例えば対象物を器用に広範囲にわたって操るために、ハンドとアームによるハンド・アームシステムが提案され、それに関する研究が進んできている¹⁾。

このようなシステムの場合、ハンドとアームが与えられた作業に対して十分な自由度を持っている場合が多く、このとき冗長なシステムとなる。この冗長性を利用して、ハンドとアームの個々の特性を生かすことができる。永井ら¹⁾はアーム先端と対象物のそれぞれにインピーダンスを設定することによりシステムを制御する方法を提案している。

本報告では、ハンドの動作コストがアームに比して小さいとして、与えられた作業をできる限りハンドによって行なうような目標値の生成法を提案する。そして、2次元平面におけるシミュレーションにより目標値がどのように生成されるかを示す。

2 ハンド・アームシステムに関する基礎式

Λ 個の関節を持つアームに h 本の指を有する多指ハンド(全関節数 λ)を取り付けたシステムを想定する(Fig.1)。図中の $\Sigma_b, \Sigma_A, \Sigma_{ob}$ は基準、アーム先端、対象物座標系を表す。また、各指は対象物と摩擦あり点接触を行っており、把持点は変化しないものと仮定する。

基準座標系 Σ_b から見た指先位置ベクトル ${}^b p_{fi} \in \mathbb{R}^n$ は、

$${}^b p_{fi} = {}^b p_A + {}^b R_A {}^A p_{A,fi} \quad (1)$$

で表される。ここで、 ${}^b p_A \in \mathbb{R}^n$ は Σ_b から見たアーム先端位置ベクトル、 ${}^A p_{A,fi} \in \mathbb{R}^n$ は Σ_A から見た第 i 指先端位置を Σ_A で表したベクトル、 ${}^b R_A$ は Σ_A から Σ_b への姿勢変換行列である。式(1)を時間微分し全指についてまとめると、指先速度 ${}^b \dot{p}_H \in \mathbb{R}^{hn}$ と関節角速度

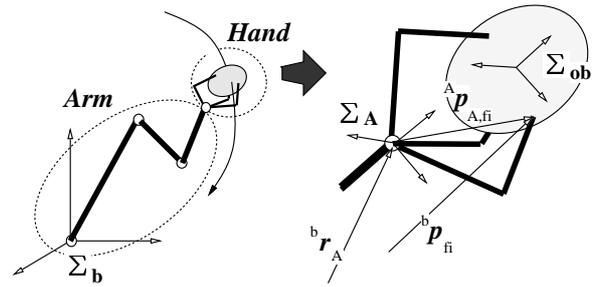


Fig.1 Model of hand-arm system and object

$\dot{\theta} \in \mathbb{R}^{(\Lambda+\lambda)}$ の関係は、

$${}^b \dot{p}_H = J_{AH} \dot{\theta} \quad (2)$$

となる。ただし、 $\theta = [\theta_A^T \theta_H^T]^T$ ($\theta_A \in \mathbb{R}^\Lambda$:アーム部関節角ベクトル、 $\theta_H \in \mathbb{R}^\lambda$:ハンド部関節角ベクトル)であり、 $J_{AH} \in \mathbb{R}^{hn \times (\Lambda+\lambda)}$ はヤコビ行列である。

また、対象物の位置姿勢ベクトル ${}^b r_{ob} \in \mathbb{R}^m$ および対象物座標 Σ_{ob} から見た把持点 ${}^{ob} p_{ob,fi} \in \mathbb{R}^n$ が与えられたとき、 Σ_b から見た指先位置ベクトル ${}^b p_{fi}$ は、

$${}^b p_{fi} = {}^b p_{ob} + {}^b R_{ob} {}^{ob} p_{ob,fi} \quad (3)$$

で表される。ただし、 ${}^b p_{ob}$ は対象物の位置ベクトル、 ${}^b R_{ob}$ は Σ_b から Σ_{ob} への姿勢変換行列である。把持点に変化しないと仮定し、式(3)を時間微分して全指についてまとめると、指先速度 ${}^b \dot{p}_H$ と対象物速度 ${}^b \dot{r}_{ob}$ の関係は、

$${}^b \dot{p}_H = J_o {}^b \dot{r}_{ob} \quad (4)$$

となる。ここで、 $J_o \in \mathbb{R}^{hn \times m}$ はヤコビ行列である。これより、式(2)、(4)から、対象物速度と関節速度の関係式

$$J_o {}^b \dot{r}_{ob} = J_{AH} \dot{\theta} \quad (5)$$

が得られる。

3 協調動作のための目標値の生成

ハンド・アームシステムが作業空間に対して冗長なシステムの場合、この冗長性をどのように利用し、ハンド部とアーム部に目標値を与えるかが問題となる。

対象物の目標軌道が一階微分可能な軌道 ${}^b r_{obd}$ で与えられた場合、式(5)より各軸目標値 $\dot{\theta}_d$ は、

$$\dot{\theta}_d = J_{AH}^+ J_o {}^b r_{obd} + (I - J_{AH}^+ J_{AH}) \xi \quad (6)$$

により求めることができる。ここで、 J_{AH}^+ は J_{AH} の疑似逆行列であり、 ξ は $(\Lambda + \lambda)$ 次元任意ベクトルであり、右辺第2項はハンド・アームシステムの冗長性を表している。

任意ベクトル ξ を $\xi = k \partial V(\theta) / \partial \theta$ ととることにより評価関数 $V(\theta)$ を極大に保つことができる。例えば、この評価関数にハンドの可操作度が考えられる²⁾が、この場合、ハンドの可動範囲内に収まるような細かな作業についてもハンドの可操作性を保とうとするためにアーム部が動いてしまう。

そこで可操作度を用いず、ハンド部が可動範囲内である限り動くように次のような評価関数を用いることを提案する。

$$\begin{cases} V(\theta) = V_A(\theta_A) + V_H(\theta_H) \\ V_A = -\sum_{i=1}^{\Lambda} (\theta_{aoi} - \theta_{ai})^2 \\ V_H = -\eta \sum_{i=1}^{\lambda} \left(\frac{1}{(\theta_{himax} - \theta_{hi})^4} + \frac{1}{(\theta_{himin} - \theta_{hi})^4} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)の右辺第1項はアームが動くことに対するポテンシャル、第2項はハンド部の可動範囲に対するポテンシャルである。ただし、 η は V_A と V_H の重みの比であり、 θ_{aoi} はアーム関節角の初期値、 θ_{himax} 、 θ_{himin} はハンド部関節 θ_{hi} の最大値、最小値である。

4 シミュレーション

Fig.2に示すような2次元平面におけるハンド・アームシステムについて、前節で述べた方法を用いてシミュレーションを行う。システムのパラメータをTable1に、ハンド部関節角の可動範囲をTable2に示す。

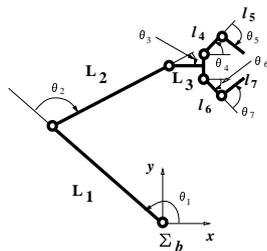


Fig.2 Hand-arm system used for simulation

Table 1 Link length

Link No.	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
Length[m]	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

初期状態 ($\theta = [150^\circ - 120^\circ - 30^\circ 45^\circ - 80^\circ - 45^\circ 80^\circ]$) から対象物に対して y 軸方向に振幅 $0.05[m]$, $0.2[m]$ の振動を与えたときに生成されたアームとハンドの軌道をそれぞれ Fig.3(a), (b) に示す。振幅が $0.05[m]$ の場

Table 2 Movable limitation of angles

Axis No.	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
min.	-30°	-120°	-60°	10°
Max.	60°	-10°	30°	120°

合、振幅が指のリンク長に比べて小さいので、ハンドの可動範囲内で作業を行なうことができ、ほぼハンドが作業を行なっていることがわかる。一方、振幅が $0.2[m]$ の場合、振幅がハンドの可動範囲を超えているため、ハンドの届かない領域をアームが動いて補償していることがわかる。

これより、前節で述べた評価関数を用いることによってできる限りハンドが作業を行ない、可動範囲を超えるような作業に対してはアームが補償するような軌道が生成されていることがわかる。

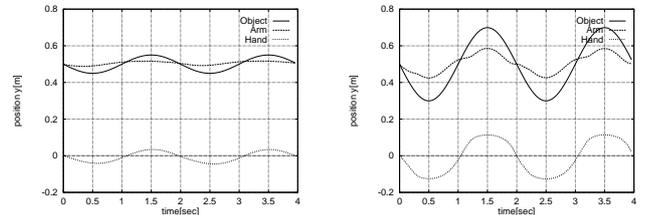


Fig.3(a) Amplitude 0.05[m] Fig.3(b) Amplitude 0.2[m]

Fig.3 Simulation Results

5 考察と今後の課題

ハンド・アームシステムが作業空間の次元に対して冗長であることを用いて、幾何学的関係からハンドとアームの協調動作のための目標値の生成法を提案し、シミュレーションによって協調的な目標値が得られることを示した。

今回はハンドの器用な操りに注目し、指の可動範囲内である限りハンドが動くような評価関数を設定し、目標値の生成を行った。しかし、物体とハンドとの関係を考慮していないため、安定な把持状態が保たれている保証はない。今後は、物体とハンドの関係を考慮した評価関数について検討する。

参考文献

- [1] 永井清, 吉川恒夫. “多指ハンドとアームの協調制御”. 第4回ロボットシンポジウム, 第1巻, pp. 155-160, 1994.
- [2] 山本元司, 黒田創明, 毛利彰. “複数台ロボットによる協調作業経路計画”. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 217-226, 1993.