

ベクトル場を用いたロボットの拘束運動制御

Constrained Motion Control of a Robot Using Vector Field

○齋藤 陽平* 羅 志偉** 渡部 慶二* 遠藤 茂*

○Yohei Saitoh*, Zhiwei Luo**, Keiji Watanabe*, Shigeru Endo*

*山形大学大学院 理工学研究科, **理化学研究所

*Yamagata University, **Riken

キーワード：拘束運動制御、速度ベクトル場、ロボット、受動性

連絡先：〒992-0038 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 応用生命システム工学科
渡部研究室 齋藤陽平, Tel: (0238)26-3178, E-mail:you@ewata.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

今日ロボットは人間に近い空間から、原子力施設や化学プラントのような危険な環境、宇宙空間や深海といったの極限環境など、幅広く用いられているが、どのような環境においても、作業空間内の人間や障害物などを破損せずに外力に応じて柔軟に運動することが求められている。

従来における自由空間でのロボットの運動制御は、位置運動のフィードバックによって系全体の安定性やロバスト性を保ってきた。しかし、このような制御方式では、コントローラは off-line で作られ、作業空間は時間的に変化しない既知のものとされていた。また、目標運動パターンは時間関数として time-base な記述が多く、予期しない不定期なイベントによりロボットの運動に支障がでた場合、望ましい運動に復帰できなくなる事態が生じてしまう恐れがある。

作業空間内で目標物や障害物が時間的に変化する環境下でロボットの柔軟な運動制御を実現するために、近年、目標運動パターンを時間的ではなく path-base に記述する新しい制御方式が提案されている。ここでは、外力に対し受動的である Passive Velocity Field Control (PVFC) [1] や、従来のシステムにより与えられた time-base な運動関数を時間軸変換することで path-base な運動を実現しようとする Path-based Motion Control [2]、さらに PVFC の受動性と Path-based Motion Control の時間軸変換を組み合わせることで一般的なコントローラに受動性と path-base な運動記述を付加する仮想干渉時間

制御[3]などが挙げられる。ただし、いずれの方式も環境拘束に関する考察が不十分である。本研究では、上に挙げた各 path-based 運動制御方式を分析し、不確かな幾何学拘束環境におけるロボットのコンプライアント運動制御の新しい枠組を提案する。

2. Passive Velocity Field Control (PVFC)

PVFC では、まずロボットの位置（関節角度）座標で表される作業空間において与えられた環境拘束条件に応じて目標速度ベクトル場 $\mathbf{V}(\mathbf{q})$ を設定する。この目標速度ベクトルによりロボットの速度制御を行う。これにより、時刻に依存しない運動が記述される。また、PVFC では外力に対して受動的にする（障害物等を破壊しないよう力を加減する）ため、仮想フライホイールの考え方を導入し、目標速度の大きさをシステム全体のエネルギーに依存して決定するようになっている。

制御対象として、以下のように n 自由度マニピュレータを考え PVFC を適用していく。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_e \quad (1)$$

ただし $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は慣性行列、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ はコリオリ力を表している。

次に、マニピュレータとのエネルギーの授受を行う仮想フライホイールを以下のように定義する

$$M_F \ddot{q}_{n+1} = \tau_{n+1} \quad (2)$$

上式に示したマニピュレータと仮想フライホイー

ルを統合し以下の拡張システムを構成する。

$$\mathbf{M}^a(\bar{\mathbf{q}})\ddot{\bar{\mathbf{q}}} + \mathbf{C}^a(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}})\dot{\bar{\mathbf{q}}} = \bar{\boldsymbol{\tau}} + \bar{\boldsymbol{\tau}}_e \quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{M}^a(\bar{\mathbf{q}}) := \begin{bmatrix} \mathbf{M}(\mathbf{q}) & \mathbf{0}_{n \times 1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{C}^a(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) := \begin{bmatrix} \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) & \mathbf{0}_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times n} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} := \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \tau_{n+1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\bar{\boldsymbol{\tau}}_e := \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{q}} := [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n \quad q_{n+1}]^T \quad (8)$$

である。

このとき、拡張システムにおいて目標拡張速度ベクトル場を以下のように定める：

$$\bar{\mathbf{V}}(\bar{\mathbf{q}}) = [\mathbf{V}(\mathbf{q})^T, V_{n+1}(\mathbf{q})]^T \quad (9)$$

ただし、

$$V_{n+1}(\mathbf{q}) = \sqrt{\frac{2}{M_F} \left(\bar{E} - \frac{1}{2} \mathbf{V}(\mathbf{q})^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{V}(\mathbf{q}) \right)} \quad (10)$$

である。ここで、 $\bar{E}$ は拡張システムの目標総エネルギーである。また、PVFC においては必要に応じてマニピュレータと仮想フライホイール間でエネルギーの授受を行うため、拡張システムの総エネルギーは一定値としている。

拡張システムの運動量 $\bar{\mathbf{p}}$ 、目標運動量 $\bar{\mathbf{P}}$ 、目標運動量に関する微分を $\bar{\mathbf{w}}$ と表したとき、実際の制御入力

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \{ \mathbf{G}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) + \gamma \mathbf{R}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) \} \dot{\bar{\mathbf{q}}} \quad (11)$$

で、ここで

$$\mathbf{G}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) = \frac{1}{2\bar{E}} (\bar{\mathbf{w}} \bar{\mathbf{P}}^T - \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{w}}^T) \quad (12)$$

$$\mathbf{R}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) = (\bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{p}}^T - \bar{\mathbf{p}} \bar{\mathbf{P}}^T) \quad (13)$$

$$\bar{\mathbf{w}}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) = \bar{\mathbf{M}}(\bar{\mathbf{q}}) \dot{\bar{\mathbf{V}}}(\bar{\mathbf{q}}) + \bar{\mathbf{C}}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) \bar{\mathbf{V}}(\bar{\mathbf{q}}) \quad (14)$$

である。

また、拡張システムにおける総エネルギー $\bar{k}$ の変化は Fig.1 より

$$\frac{d}{dt} \bar{k}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) = \boldsymbol{\tau}_e^T \dot{\bar{\mathbf{q}}} \quad (15)$$

で表され、このときロボットの運動速度

$$\dot{\bar{\mathbf{q}}} \rightarrow \beta \bar{\mathbf{V}}(\bar{\mathbf{q}}) \quad (16)$$

が実現される。ただし、

$$\beta = \sqrt{\frac{\bar{k}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}})}{\bar{E}}} \quad (17)$$

とシステムの総エネルギーの平方根に比例して決定される。

上述のように、PVFC では外力がない場合は、システムの総エネルギーは変わらず安定であり、システムの総エネルギーは外力によってのみ変化することから受動性があるといえる。しかしながら、PVFC 制御方式では、目標速度ベクトル場が時間的に不変で、また環境拘束の不確かさへの対応が考察されていない。

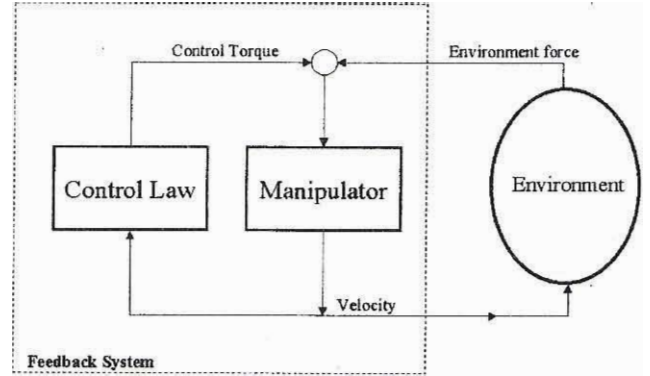


Fig.1 ロボットのPVFC制御

3. Path-based Motion Control

運動目標を時間不変の速度ベクトル場で与えるPVFC方式に比べて、Tarn.らは不測イベントに応じた時間軸変換による path-based ロボット制御方式を提唱している。この方式では、基本的に従来のロボットの運動制御方式で時間駆動の目標運動指令に従ってロボットの制御を施すが、外部の不測事象が発生した場合、それに応じて時間軸の伸縮変換を行い、衝突の回避や回避後の軌道への緩やかな運動復帰を図っている。

具体的に、ロボットの運動方程式

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (18)$$

と表される場合、非線形フィードバック制御によって以下のように制御入力。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D} \mathbf{J}_h^{-1} [\ddot{\mathbf{Y}}^d(t) + \mathbf{K}_n \dot{\mathbf{e}}(t) + \mathbf{K}_p \mathbf{e}(t) - \dot{\mathbf{J}}_h \dot{\mathbf{q}}] + \mathbf{C} + \mathbf{G}$$

を与える。ただし、

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{Y}^d(t) - \mathbf{Y}(t)$$

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \dot{\mathbf{Y}}^d(t) - \dot{\mathbf{Y}}(t)$$

はそれぞれ位置と速度の誤差である。

上式において $\mathbf{Y}$ はロボット位置、 $\mathbf{Y}^d$ はロボットの目標位置を表しており、いずれも時間 t に依存している。そこで、時間に依存しない時間 t と同等の参照変数として s を導入する。この s はロボットの現在位置 $\mathbf{Y}(t)$ と外部事象から求めるもので、これによって新たな Motion Reference が生成される。この手法の構

成を Fig.2 に示す。現在位置 Y_1 から目標軌道に対して垂線を下ろし、その点に対応する実時間軌道での t の値を仮想的な時間軸上での s_1 とする。このように、Path-based Motion Control では、時間軌道の逆関数を用いて Motion Reference が参照変数を t から s に変換することで、図 3 のように $Y^d(t)$ の計算に用いた planner をそのまま利用し、Path-based な運動記述とすることができる。

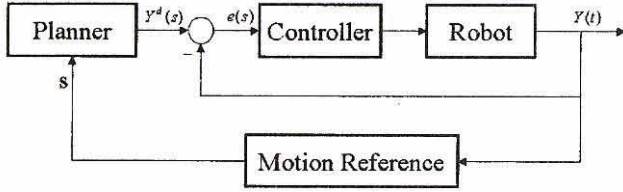


Fig.2 時間軸変換による path-based 制御方式

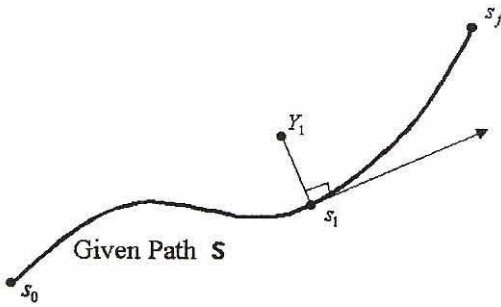


Fig.3 時間軸変換

4. 仮想干渉駆動制御

仮想干渉駆動制御では、PVFC 同様に拡張システムを設定した後、拡張システムの制御入力 $\bar{\tau}$ を

$$\bar{\tau} = P\bar{q} \quad (22)$$

のように設定する。ここで、

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\tau_1 \dot{q}_{n+1}^{-1} & -\tau_2 \dot{q}_{n+1}^{-1} & \dots & -\tau_n \dot{q}_{n+1}^{-1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

という歪対称行列とすることで、ロボットから仮想フライホイールへの一方的な干渉力が生じるようにしている。このときの拡張エネルギー K^a の時間微分は

$$\dot{K}^a = \dot{\bar{q}}^T (\bar{\tau} + \bar{\tau}_e) \quad (24)$$

となるので、外力を $\bar{\tau}_e = 0$ とすれば

$$\dot{K}^a = \dot{\bar{q}}^T P \dot{\bar{q}} = 0 \quad (25)$$

が成り立ち、拡張システムは受動的となることので

きる。つまり、仮想フライホイールへの一方的な干渉力を考慮することで、ロボットへ受動性が付加できることになる。さらに、time-base で記述した目標軌道を path-base なものに変換するために、仮想時間軸を導入する。目標軌道 $x_d(t)$ に対し、仮想時間軸 s 上での軌道 $x_d(s)$ を考え、この目標速度は

$$\frac{d}{dt} x_d(s) = \frac{\partial x_d(s)}{\partial s} \dot{s} \quad (26)$$

となる。ここで、仮想時間の流れる速さを

$$\dot{s} = 1.0 + \zeta \Delta K$$

$$\Delta K := K^a - K_d^a$$

と定める。ここで、 ζ はエネルギー変化に対する感度を調節する働きを持つフィードバックゲインで、 K_d^a は目標エネルギーである。 K_d^a は通常 K^a の初期値などをとればよく、 ΔK は

$$\Delta K = \int \dot{q}^T \tau_e dt \quad (29)$$

と証明できるので、外力による拡張エネルギーの変化によって仮想時間軸の流れる速さが決定され、時間駆動な目標軌道記述が利用可能となる。ただし、この制御方式でも、ロボットによる未知環境へのコンプライアンスについて言及されていない。

5. 拘束運動制御の新しい枠組

本研究では、不確かさを持つ環境の幾何学的拘束におけるロボットのコンプライアント運動について焦点を当てる。ここで取り上げる拘束運動について PVFC を用いるにあたりいくつかの問題点が挙げられる：

- 環境拘束を反映していないこと
- 拡張系の総エネルギーを超えた場合ロボットの動作を保証できない。

これらの問題点を踏まえて、本研究は Fig.5 に示す未知環境における拘束運動を行うロボットの新しい制御枠組を提案する。この枠組では、ロボットは基本的に PVFC によって制御されるが、環境拘束との相互作用において発生した不測な環境反力がある場合、ロボットと仮想フライホイールとエネルギーの交換を行いながら、目標速度ベクトル場 $V(q)$ を更新する。これによって、ロボット+仮想フライホイールの拡張系の総エネルギー量も更新される。したがって、目標速度ベクトル場 $V(q)$ はもはや時不変でなくなり、拡張系の総エネルギー量も一定値でなくなるので、ロボットと環境システム全体の安定性保障する新たな制御措置を講じる必要がある。

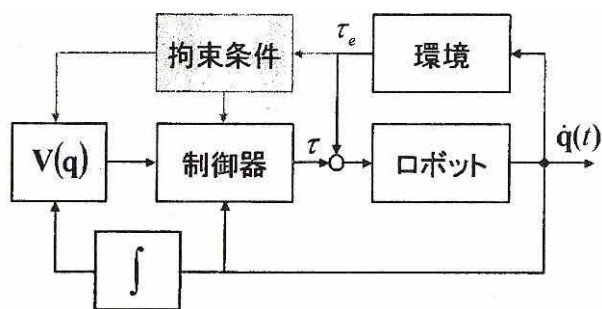


Fig. 4 拘束運動制御の新しい枠組

6. シミュレーション考察

拘束運動制御のシミュレーションでは、Fig. 5 に示されるようなマニピュレータを用いロボットの手先で円を描く運動を行わせる。また、各パラメータを Table.1 に示す。

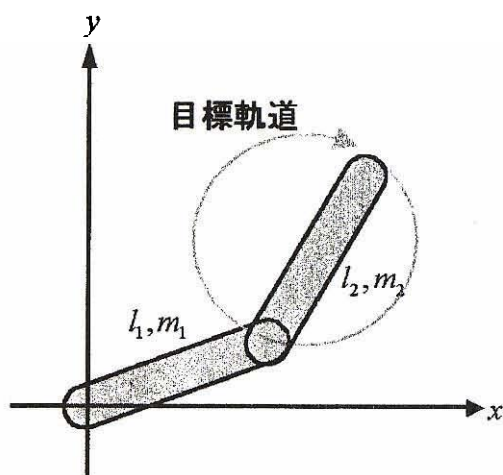


Fig. 5 2軸マニピュレータ

パラメータ	値
$m_1(kg)$	5.0
$m_2(kg)$	2.0
$l_1(m)$	2.3
$l_2(m)$	2.3

Table.1 マニピュレータのパラメータ

ロボットを運動させたときのロボットおよび仮想フライホイールのエネルギー変化は Fig.6 のようになった。このとき、ロボットに対して運動するのに十分なエネルギーを初期値として与えている。

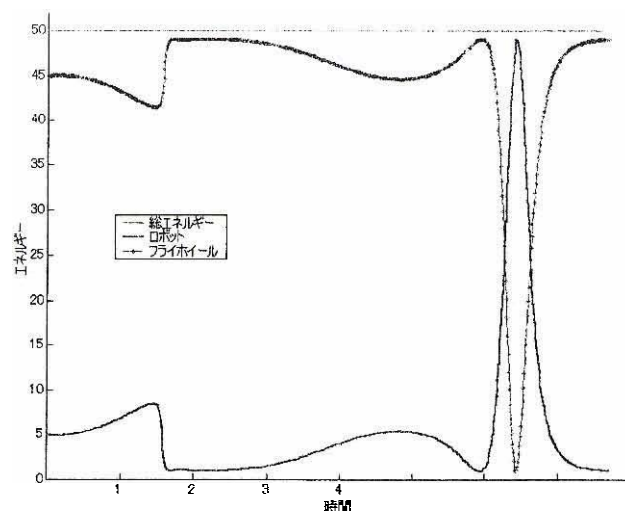


Fig.6 PVFC でのエネルギー変化

このグラフからも、ロボットと仮想フライホイール間でエネルギーの授受が行われ、PVFC により全体のエネルギーが一定に保たれていることがわかる。

7. おわりに

本研究では、未知環境におけるロボットの拘束運動制御について、近年提案された PVFC 方式や時間軸変換による Path-base Motion Control などの手法を検討し、マニピュレータに PVFC を適用し拘束運動制御を行うための問題点や改良法などの考察をくわえた。今後の課題として、シミュレーションとロボット実機実験を通して本提案のシステムについて、定性的かつ定量的な分析を行っていく必要がある。

参考文献

- [1] Perry.Y.Li and Roberto Horowitz "Passive Velocity Field Control of Mechanical Manipulators"
- [2] Tzyh-Jong Tarn, Ning Xi and Antal K. Bejczy "Path-based Approach to Integrated Planning and Control for Robotic Systems"
- [3] 浅野文彦, 山北昌毅, 岩田高明 "System Augmentation によるメカニカルシステムの受動化と制御"