

運動状態からの時間情報再構成によるロボスト到達運動制御

杉原知道 (大阪大学)

1. はじめに

ロボットに作業をさせる上で、動作完了にどの程度の時間を要するかは重要な情報である。作業工程が完全に管理される産業用ロボットにおいては、時刻に対応付けられた姿勢の系列として動作を記述することが常識的に行われている。しかし、外乱に富む未知の状況で運用可能なロボットの実現を目指すとき、上記の方法は適切でない。たとえば外力によって運動が阻害され、計画動作と実際の運動とが大きく乖離したにも関わらず、計画通りの時刻に動作終了させようとするとき、正常な挙動が期待できなくなる。このようなロボットシステムでは、与えられた時間はあくまでもノミナルなものとし、動作速度の決定などに利用しながらも、現状を優先して終了予定時間を適宜修正する、すなわち運動状態から時間情報を再構成することが望ましい。

本稿では簡単な1次元到達運動、特にモデル予測制御を用いて与えられた境界条件を満たそうとする制御において、現在の位置・速度および到達時間に基づいて駆動力を決定しながら、同時に運動状態から適宜到達時間を修正する方法を提案する。現在の状態から目標位置に至るまでに相空間上で辿るであろう軌道を推定し、その軌道上で現在の位置・速度がどの程度時間発展した状態にあるのかを評価する。これに基づいて、到達までの時間を再設定する、という考え方である。駆動力決定と到達時間修正は常に並行的に行うため、例外処理を必要とせず実装は単純である。

2. モデル予測制御を用いた到達運動制御

次の運動方程式で表される1次元運動を考えよう。

$$\ddot{s}(t) = u(t) + u_d(t) \quad (1)$$

ただし、 t は時刻、 $s(t)$ は運動点の1次元座標、 $u(t)$ は駆動力、 $u_d(t)$ は外力である。到達運動制御は、 $s(t)$ を与えられた目標座標 d_s に収束させる $u(t)$ を決定する問題である。多くの場合、到達に要する時間 T 、始動時および到達時に速度零であることが付加的に要求され、それぞれ次のような境界条件として表現される。

$$s(T) = d_s \quad (2)$$

$$\dot{s}(0) = \dot{s}(T) = 0 \quad (3)$$

人の到達運動制御器モデルとして、躍度最小化制御 [1]、トルク変化率最小化制御 [2]、終端誤差分散最小化制御 [3] 等が提案されている。これらはいずれも、リアルタイム最適制御の一種であるモデル予測制御として定式化できる。本稿では、同様に定式化できる最も簡単なものとして、駆動力最小化制御を考えよう。駆動力 $u(t)$ は、次の最小化問題を解くことで決定される。

$$E = \int_t^T u(\tau)^2 d\tau \rightarrow \min. \quad \text{s.t. Eq.(2) and (3)} \quad (4)$$

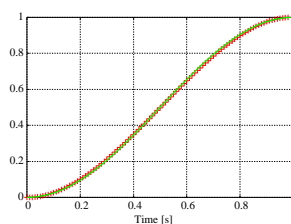


図1 運動軌跡への余弦関数フィッティング

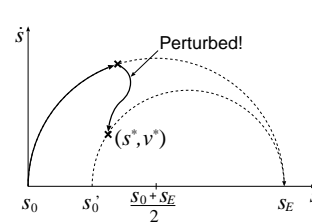


図2 相空間上の到達運動の近似軌跡

運動方程式 (1) の下で $u_d(t) \equiv 0$ としてこれを解くと、 $u(t)$ は次のように得られる。

$$u(t) = \frac{6}{(T-t)^2} \left\{ d_s - s(t) - \frac{2}{3} \dot{s}(t)(T-t) \right\} \quad (5)$$

この制御器を含め、上記の種々の制御器の優劣を議論することは本稿の目的ではない。式 (5) のように、駆動力が現在の状態 $(s(t), \dot{s}(t))$ および到達までの残り所用時間 $T-t$ から決定されることが重要であり、この点で上記の制御器は全て同列に利用可能である。

ロボットにとって条件式 (2) および (3) は、一定時間内での作業完了を保証する、駆動器の負担を低減する等の実用上の意味がある。しかし外乱に満ちた状況においては、トップダウンに与えられた時間 T に拘束されるこれらの条件自体が不適切となり得る。例えば強い外力によって $s(t)$ が d_s から遠ざかったとしよう。それと無関係に時間 t は増加するため、 $u(t)$ は過剰な値になりがちである。ロボストな制御を実現する上では、 T を参照しながらも、それに硬く拘束されるのではなく、ロボット自身が運動状態に応じて T 、あるいは残り所用時間 $T-t$ を変更できることが望ましい。すなわち、運動状態に基づいて時刻 t を再設定できるか否か、という一見奇異な問いが主題となる。

3. 運動状態から到達までの所用時間再設定

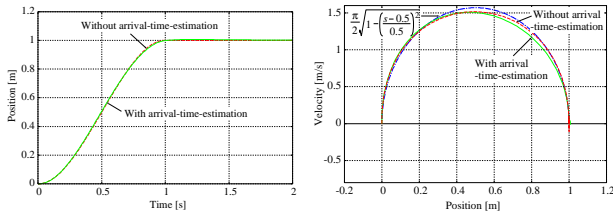
発見的ではあるが、条件 (2) および (3) を満たす曲線として次の余弦曲線を考えよう。

$$s(t) = \frac{d_s + s(0)}{2} - \frac{d_s - s(0)}{2} \cos \frac{\pi t}{T} \quad (6)$$

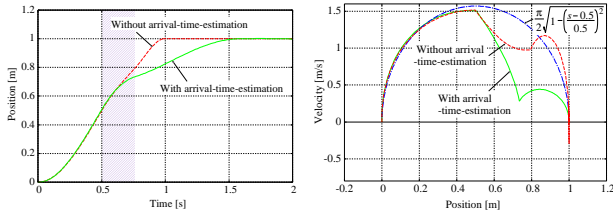
図1は、 $d_s = 1$ 、 $s(0) = 0$ 、 $T = 1$ の下で制御器 (5) に対し得られた $s(t)$ の軌跡と、上記の曲線を重ねて示したものであり、定性的にこれらが近いことが分かる。式 (6) を時間に関して1階微分すると、次を得る。

$$\dot{s}(t) = \frac{\pi}{T} \frac{d_s - s(0)}{2} \sin \frac{\pi t}{T} \quad (7)$$

これらより、式 (6) で決まる $s(t)$ の相空間上の軌跡は半円状になることが分かる。そこで、制御器 (5) で決まる $s(t)$ もおおよそ同じ半円をたどると近似する。



(a) 時間軌跡 (b) 相空間上軌跡

図3 加速度最小化制御に基づく到達運動の軌跡 ($d = 0$)

(a) 時間軌跡 (b) 相空間上軌跡

図4 加速度最小化制御に基づく到達運動の軌跡 ($d = 5$)

さて今、図2のように、ある時刻に点が摂動を受けて状態 $(s, \dot{s}) = (s^*, v^*)$ に強制遷移させられたとしよう。このことによって、到達までのノミナル所用時間が同じく T である相似な運動軌道に乗ったと仮定する。この軌道上で $(s, \dot{s}) = (s^*, v^*)$ から d_s に到達するまでの所用時間を推定したい。新たに乘った軌道は、元の軌道と異なる時間原点 $t = 0$ および初期位置 $s(0) = s'_0$ を持ち、この下で同様に次式のように近似可能である。

$$s(t) = \frac{d_s + s'_0}{2} - \frac{d_s - s'_0}{2} \cos \frac{\pi t}{T} \quad (8)$$

$$\dot{s}(t) = \frac{\pi}{T} \frac{d_s - s'_0}{2} \sin \frac{\pi t}{T} \quad (9)$$

これらより、 s'_0 は次のように逆推定できる。

$$s'_0 = s^* - \frac{r^2}{e} \quad \text{ただし } r \equiv \frac{v^* T}{\pi}, \quad e \equiv d_s - s^* \quad (10)$$

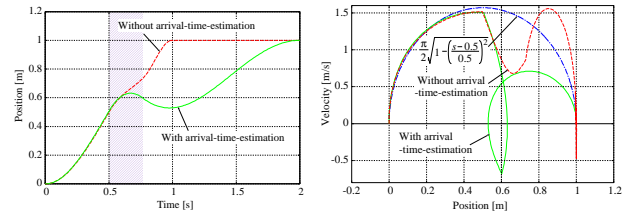
式(8)(10)より、仮に時刻を $t = 0$ まで遡り s'_0 から始動して時刻 $t = t^*$ に状態 $(s, \dot{s}) = (s^*, v^*)$ に達したと考えたとき、到達までの残り時間は次式で推定できる。

$$T - t^* = T - \frac{T}{\pi} \text{atan2} \left(2r, e - \frac{r^2}{e} \right) \quad (11)$$

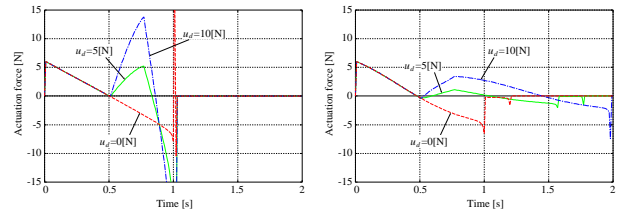
4. シミュレーション

初期条件 $s(0) = 0$ [m], $\dot{s}(0) = 0$ [m/s], 目標座標 $d_s = 1.0$ [m], ノミナル到達時間 $T = 1$ [s] とし、時間刻み幅 0.01 [s] のオイラー法にて1次元到達運動制御のシミュレーションを行った。運動中、外力 $u_d(t)$ を、 0.5 [s] $\leq t \leq 0.75$ [s] のときのみ一定値 $d = 0, 5, 10$ [N] で与えた。それぞれに対する結果を図3, 4, 5に示す。各々において、(a)は s の時間変化、(b)は s - \dot{s} 空間上の軌跡であり、破線(赤線)は従来方法(提案する到達時間推定を行わない制御)、実線(緑線)は提案方法(到達時間推定を行う制御)の結果である。相空間上軌跡の図では、式(6)の与える軌跡も同時に示してある。

まず図3より、外乱がない状況で提案方法は従来方法と同程度の収束性能を持つことが分かる。また相空



(a) 時間軌跡 (b) 相空間上軌跡

図5 加速度最小化制御に基づく到達運動の軌跡 ($d = 10$)

(a) 到達時刻推定なし (b) 到達時刻推定あり

図6 加速度最小化制御における駆動力

間上では、従来方法と提案方法どちらの軌跡も半円でよく近似できている。図4, 5より、従来方法では外乱による摂動を受けた後も $t = T$ [s] に到達しているが、提案方法では摂動後に到達時刻を自動的に延長している。図6(a)および(b)は、それぞれ従来方法および提案方法における駆動力の履歴であり、提案方法の効果を端的に示している。従来方法では、不変な T に対する終端境界条件を満たすため摂動後に比較的大きな駆動力を発生させている。一方提案方法では、摂動の有無に対し駆動力の大きさは大きく変わっていない。

5. おわりに

ロボットに、外乱下でもロボストに到達運動を行わせる上で、運動状態から時間情報を再構成することの必要性を示し、相空間上で近似された軌道に基づいてこれを行う方法を提案した。外乱が無い場合は従来方法と同程度の収束性能を持ち、かつ強い摂動を受けた場合でも過剰な駆動力の発生を防げることを示した。

本研究は、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(課題番号#26540135)、科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号#15H02762)および新エネルギー・産業技術総合開発機構環境・医療分野の国際研究開発・実証プロジェクト/ロボット分野の国際研究開発・実証事業「災害対応ロボット・オープンプラットフォームの研究開発」(代表:中村仁彦)の支援で行われた。

参考文献

- [1] T. Flash and N. Hogan. The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 1688–1703, 7 1985.
- [2] Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki. Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement – Minimum Torque Change Model. *Biological Cybernetics*, Vol. 61, pp. 89–101, 1989.
- [3] C. M. Harris and D. M. Wolpert. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, Vol. 394, pp. 780–784, 1998.