

高速スローイング動作におけるエネルギー伝播の解析

○ 妹尾 拓 (東大) 並木 明夫 (東大) 石川 正俊 (東大)

The Analysis of Energy Propagation in High-speed Throwing Motion

○ Taku Senoo (Univ. of Tokyo) Akio Namiki (Univ. of Tokyo) Masatoshi Ishikawa (Univ. of Tokyo)

Abstract: A human can generate smooth motion instantaneously although there are numerous degrees of freedom to be controlled. This is because a human builds interference structure of degrees of freedom such as interlocking or decreasing mechanism. For instance, in human throwing motion we can see the movement called "kinetic chain" which enables to propagate kinetic energy. Based on this motion, a throwing strategy focused on the superposition of wave patterns is proposed in this paper. The evaluation on energy propagation is also analyzed.

Key Words: high-speed manipulation, robotic throwing, kinetic chain

1 はじめに

人間は筋肉や骨格などの身体を伴う多自由度の力学系である。そのため膨大な情報の処理や制御をすべて同時におこなうことは現実的ではなく、自由度の連動や凍結といった干渉構造を作り上げることにより、無理のない滑らかな動作を瞬時に発現していると考えられている [1]。投球動作はそのような動作の一例であり、効率よく高速な動作を実現する高度な運動技能である。

そこで本稿では投球動作を参考にして、エネルギーの伝播・トルクの効率・軌道の評価といった観点から高速現象を解析した。

2 投球動作

2.1 波動の重ねあわせに基づく運動生成

人間の投球動作では、手先の運動を高速化するために体幹から指先にかけて全自由度を連動させるキネティックチェーンという動作がみられる [2]。本稿ではその運動を Fig.1 のような波の重ね合わせの現象と捉えて、投球動作を以下の点に注目して構成していく。

(i) 基準モード

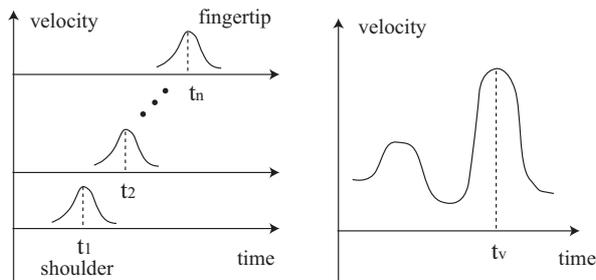
各関節の速度波形を正弦波として表現することにする。よって関節角度および関節加速度もすべて正弦波で表現できる。

$$q = q_0 - \text{Cos}(\omega t + \phi) \alpha \quad (1)$$

$$\dot{q} = \Omega \text{Sin}(\omega t + \phi) \alpha \quad (2)$$

$$\ddot{q} = \Omega^2 \text{Cos}(\omega t + \phi) \alpha \quad (3)$$

ここで q_0 は定数、 $\text{Sin}(\lambda) \equiv \text{diag}[\sin \lambda_1, \dots, \sin \lambda_n]$ 、 $\Omega \equiv \text{diag}[\omega_1, \dots, \omega_n]$ であり、 ω, ϕ, α は波動における周波数・



(a) each pattern

(b) superposition pattern

Fig. 1 Wave pattern

位相・振幅に相当する。すると手先の速度は、次式のように各波形を重ね合わせた形で表される。

$$\dot{r}_E = J\dot{q} = J\Omega \text{Sin}(\omega t + \phi) \alpha \quad (4)$$

ここで J はヤコビアンであり、これが波動の重ね合わせ係数となる。以後は波動に関するパラメータを ξ として表すことにする。

$$\xi = \begin{bmatrix} \omega \\ \phi \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

(ii) 位相差運動

干渉作用を積極的に利用することで、運動速度やエネルギーを手先に効率よく伝播することを考える。そこで次式のように、関節 i の速度波形がピーク値を取る時刻 t_i を次々と先端の部位へ遷移させていく。

$$t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n \quad (6)$$

式 (2) より t_i が満たすべき条件は $\omega_i t_i + \phi_i = \pi/2$ なので、式 (6) は波動パラメータを用いて以下のように書ける。

$$\omega_{i+1}(-\phi_i + \pi/2) \leq \omega_i(-\phi_{i+1} + \pi/2) \quad (7)$$

$$(i = 1, \dots, n-1)$$

(iii) テイクバック

投球物体に伝播されるエネルギー E は、作用する力 F_e と加速距離の積で計算される。

$$E = \int F_e \cdot dr \quad (8)$$

つまり投球方向とはいったん逆向きの運動をおこなって加速距離を大きくすることで、速度およびエネルギーの増幅効果が得られると考えられる。一方、摩擦などの散逸エネルギーを小さくして物体に多くのエネルギーを伝えることも重要であるが本稿では考慮しないことにする。

2.2 スローイングアルゴリズム

手先速度は以下のように波動パラメータと時間の関数として表現できる。

$$\dot{r}_E = \dot{r}_E(\xi, t) \quad (9)$$

波動パラメータ ξ を固定したとき、手先の最高速度を与える時間 t_v は以下のように与えられる。

$$t_v = \left\{ t \mid \max_t \|\dot{r}_E\|, -\frac{\phi_1}{\omega_1} \leq t \leq \frac{\pi - \phi_n}{\omega_n} \right\} \quad (10)$$

これに式 (7) の位相遷移条件およびキネマティクス拘束・ダイナミクス拘束を加えた条件のもと、以下の評価関数を最大化する波動パラメータ ξ を計算する。

$$\max_{\xi, t=t_0} \dot{r}_E^T K_r \dot{r}_E \quad (11)$$

subject to

$$\begin{aligned} \omega_{i+1}(-\phi_i + \pi/2) &\leq \omega_i(-\phi_{i+1} + \pi/2) \\ \dot{q}_{\min} &\leq \dot{q}(\xi) \leq \dot{q}_{\max} \\ \tau_{\min} &\leq \tau(\xi) \leq \tau_{\max} \end{aligned}$$

ここで K_r は正定値行列である。手先リンクの有効質量を m , $K_r = \text{diag}[\frac{1}{2}m, \frac{1}{2}m, \frac{1}{2}m]$ とすれば手先の並進運動エネルギーを最大化することと等価である。

3 シミュレーション

3.1 設定

Fig.2 に表示している Barrett Technology 社の 4 軸マニピュレータ (Barrett arm) をモデル化してシミュレーションをおこなった。今回は対象物を投げてコントロールすることは考慮せずに、テイクバックした状態からの腕のスイング軌道を解析した。また 4 軸のうち 2 番目に相当する関節を固定した。

3.2 結果

波動の伝播効果を確認するため、位相遷移条件を満たしていないが各関節の速度および全体の動作時間が最適化軌道より速い正弦波軌道と比較することにする。

3 次元での投球軌道を Fig.3 に示す。テイクバックして腕を伸ばした状態から、肩の外転および内旋に続いて肘の屈曲をおこなう連動した運動が確認できる。

Fig.4 は関節速度とそれに対応する手先の速度を表している。最適化軌道では関節ピーク値が次々と手先に移行している様子が示されている。関節速度は最適化前の軌道の方が速いにもかかわらず、手先の運動速度はどちらもほぼ同じ速度が出ていることがわかる。

Fig.5 に最適化前後におけるトルク変化のデータを示す。軌道はどちらも正弦波から生成されているため全体的な波形の形状は似ているが、トルクの大きさは最適化後の軌道の方が少なくなっていることがわかる。

以上より、干渉トルクをうまく利用して効率よく波動が伝播されることにより、少ないトルクで高速な運動が生成されているのが確認できる。

4 まとめ

波動の重ね合わせに基づいた運動生成を提案することで、投球動作の解析をおこなった。今後の課題はハンド

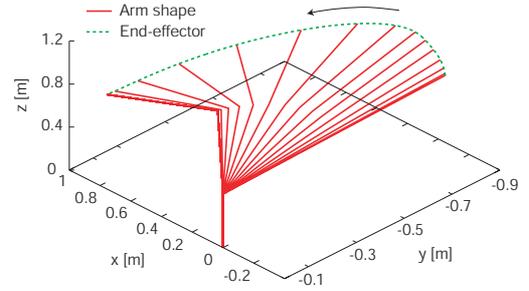
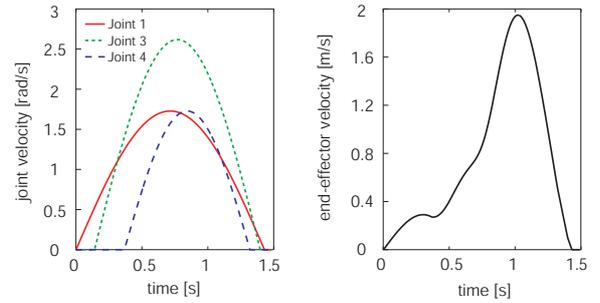
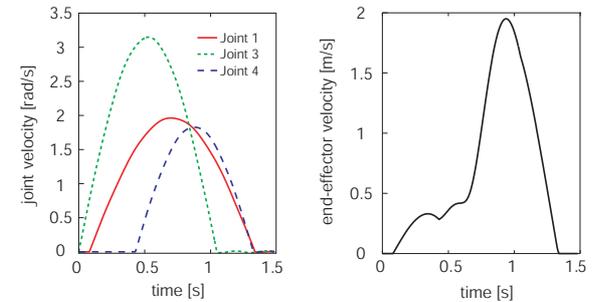


Fig. 3 Throwing motion

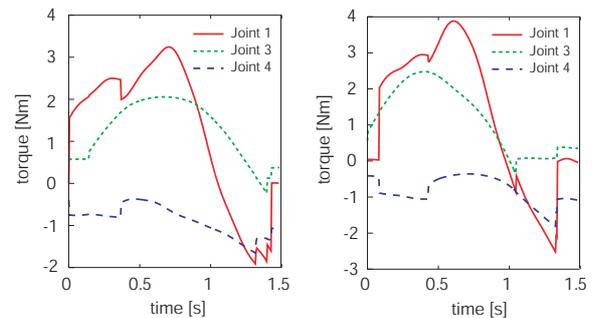


(a) Optimized velocity



(b) Non-optimized velocity

Fig. 4 Modification of velocity



(a) Optimized torque

(b) Non-optimized torque

Fig. 5 Modification of torque

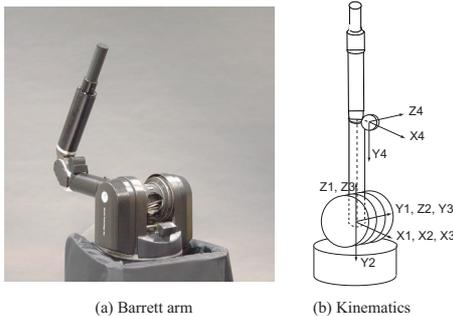


Fig. 2 Manipulator

と投球物体の接触モデルを構築すること、および実験による検証などが挙げられる。

References

- [1] 佐野, 中村, 多賀, 有本, 宇野, 篠田, 三嶋, 遠藤. 人間における知能の力学的理解. システム制御情報学会誌, Vol.46, No.1, pp.2-41, 2002.
- [2] 金子, 福永. バイオメカニクス-身体運動の科学的基礎-. 杏林書院, 2004, pp.262-268.