

# 波動伝播に基づく高速スローイング動作

## High-speed Throwing Motion Based on Wave Propagation

妹尾 拓 (東大) 正 並木 明夫 (東大) 正 石川 正俊 (東大)

Taku SENOO, Akio NAMIKI and Masatoshi ISHIKAWA

University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

The speed of recent robotic manipulation is very slow although a mechanical system excels in the speed of motion fundamentally. On the other hand various inventions which contribute to fast movement are reported in human motion. For instance, in human throwing motion we can observe 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 order to achieve high-speed robot motion. The evaluation on contact modeling for control of a target is also analyzed.

Key Words : *high-speed manipulation, kinetic chain, throwing motion*

### 1. はじめに

近年、センサやアクチュエータなどのロボットコンポーネントの機能・性能が向上して、多指ハンドや二足歩行ロボットといった従来よりも汎用性の高いロボットが実現されてきている。しかしそれらを運動能力という点からみると、機械システムが本来得意とする高速性を兼ね備えたロボットはほとんど存在しない。ロボットには作業効率の向上や危険回避動作といった速い運動の要求が依然として存在することから、高速性はロボットシステムを開発する上で重要な評価指標といえる。

人間においては、高速動作の発現に関与する機構や現象が色々と報告されている。神経伝達遅延を補うために遠心性コピーを用いたり、パリストリックな運動（投げる、ジャンプするなどの急激な変動を伴う運動）に対して求心性信号を速く伝送するための専用の錐体路が存在している<sup>1)</sup>。また自由度の運動や凍結といった干渉構造を作り上げることで、全身の多自由度の制御を並列かつリアルタイムに実行していると考えられている<sup>2)</sup>。つまり高速な運動を生成するには、スタティックな運動を単に素早く実行するのではなく、普段の運動とは異なったメカニズムやアルゴリズムが作用していると解釈できる。

本稿では人間の投球時に見られるキネティックチェーンという現象を参考に、Fig.1.1のようなハンドアームシステムにおけるマニピュレーションの高速化を目的とする。キネティックチェーンとは各関節の動作を適切に連動させることで手先の運動を高速化する技能である。はじめにロボットにおける投球動作の戦略を説明し、シミュレーション結果を実験により検証する。そして投球ボールをコントロールするための接触モデルについて述べ、解析結果を説明する。

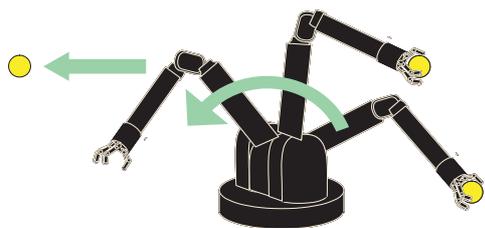


Fig. 1.1 Throwing motion using a hand-arm system

### 2. 投球スウィングの高速化

手先の動作速度を最大化することを考えると、一般的には最適化計算によりハンドアームのトルク時系列を求める問題に帰着する。しかしこの手法では、シミュレーション設定や計算時間の点で非常に効率が悪い。またロボットの動きが事前に推定できないという点も問題である。そこで本研究では人間の投球動作を参考にして高速化の要因となる運動の枠組みを抽出し、それをロボットへ適応するための動作戦略を提案する。

2-1 人間の投球動作<sup>3)</sup> 人間のリリース時の手先速度は約28[m/s]にまで達する。これには35~50[rad/s]の手首の掌屈速度および35~43[rad/s]の肘の伸展速度が大きく貢献しているが、その発生トルクは手首で5[Nm]以下、肘で20[Nm]以下と著しく小さい。また、人間の筋が瞬間的に発揮できる最大パワーは筋重量1[kg]あたり約255[W]とされている。一方ハンドボールのリリースする瞬間のパワーは約4200[W]であり、全身の筋肉量や拮抗筋の存在を加味しても過大すぎる。

手先の速度やボールに与えられるパワーに注目してみると、特にリリース直前に急激に増加している。これは初期段階に全身に蓄えられた運動エネルギーがリリース時に一気に放出するメカニズムが働いているといえる。これがキネティックチェーンという動作であり、効率よく高速なスウィングを実現するための技能である。このときの各関節の運動を観測すると、体幹から指先にかけて速度波形のピークの位相を次々と手先の部位へ移行している。これが干渉作用を生み出すことにより、通常よりも高速な運動が可能になるといわれている。

2-2 波動の重ねあわせに基づく運動生成<sup>4)</sup> 本稿ではキネティックチェーンをFig.2.1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3点に注目して構成していくことにする。

(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,  $\omega, \phi, \alpha$  は波動における周波数・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  $\xi$  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とることで, 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, 摩擦力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.

2-3 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.

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

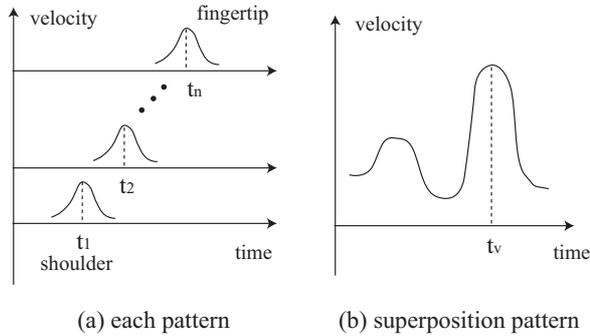


Fig. 2.1 Wave pattern

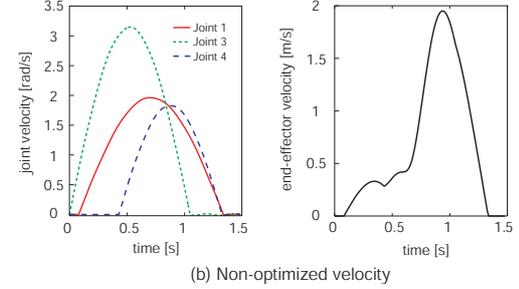
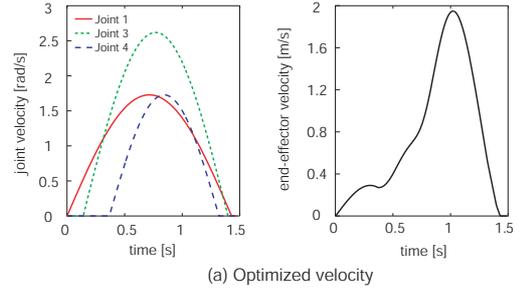


Fig. 2.2 Modification of velocity

波動パラメータ  $\xi$  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  $\xi$  を計算する.

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

subject to

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

ここで  $K_r$  は正定値行列,  $\tau$  はトルクである. 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.

2-4 実験 アームはワイヤ駆動の4軸マニピュレータである (Barrett Technology Inc.). 肩・肘関節にそれぞれ旋回と屈曲の自由度を持っていて, 最高速度  $6 \text{ m/s}$ ・最高加速度  $58 \text{ m/s}^2$  の動作が可能である. ハンドは3本指8自由度に手首2自由度を有し, トルク・重量比は従来のものに比べ約3.5倍能力を発揮することができる.  $180$ 度の指の開閉を  $0.1$ 秒以内に行えるという高速性を実現している.

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.

Fig.2.2 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

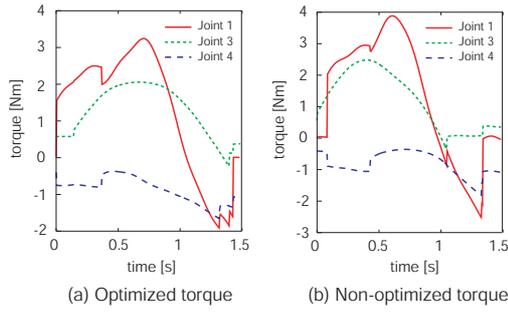


Fig. 2.3 Modification of torque

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，手先の運動速度は最適化軌道のほうが速いことがわかる．

Fig.2.3 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．

以上より各関節の速度ピークが重ならず位相遷移を保ったまま最適化計算が収束したことから，波動が適切に伝播されたといえる．また少ないトルクで高速な運動が生成されているため，効率よく波動が伝播されていることが確認できる．図 2.4 に 33 ms 間隔の連続写真を示す．

### 3. 投球ボールのコントロール

本章ではボールをコントロールするための指の動きおよび接触の状態遷移について解析する．

3-1 ハンドとボールの接触モデル 指先リンクとボールを剛体と仮定する．基準座標系に対して並進加速度  $\alpha_0$ ，角速度  $\omega_0$  で運動している座標系  $\Sigma_E$  で記述したボールの運動方程式は次式で表現できる．

$$m\ddot{r}' = F' - m(\alpha_0 + \dot{\omega}_0 \times r') + 2m\dot{r}' \times \omega_0 + m(\omega_0 \times r') \times \omega_0 \quad (12)$$

ここで  $m, r$  はボールの質量・位置， $F'$  はボールに加わる力，第 2 項は座標系の加速度運動に起因する慣性力，第 3 項はコリオリ力，第 4 項は遠心力である．投球動作では，高速に運動することおよび 3 次元の回転運動をおこなうことから，非慣性系に特有の見かけの力が無視できない点が特徴である．

ここで以下の手順でボールを投げることにする．

- (i) ある時刻まで 3 本の指でボールがハンドから離れないように把持している．
- (ii) あるタイミングで支えている 1 本の指をボールから離して残りの 2 本の指の接触に切り替える．
- (iii) 2 本指が同じスナップ動作をおこないそのリンク方向に転がりながらリリースする．

Fig.3.1 のように座標系  $\Sigma_E$  の  $x$  軸を 2 本指のリンク方向に， $y$  軸を 2 本指に垂直な方向に， $z$  軸を指先自由度の回転軸方向にとる．半径  $a$ ，慣性モーメント  $I = \frac{2}{5}ma^2$  のボールが滑らずに転がり角  $\phi$  で運動する条件は以下で記述できる．

$$I\ddot{\phi} = aF_x, \quad \dot{x} = a\dot{\phi} \quad (13)$$

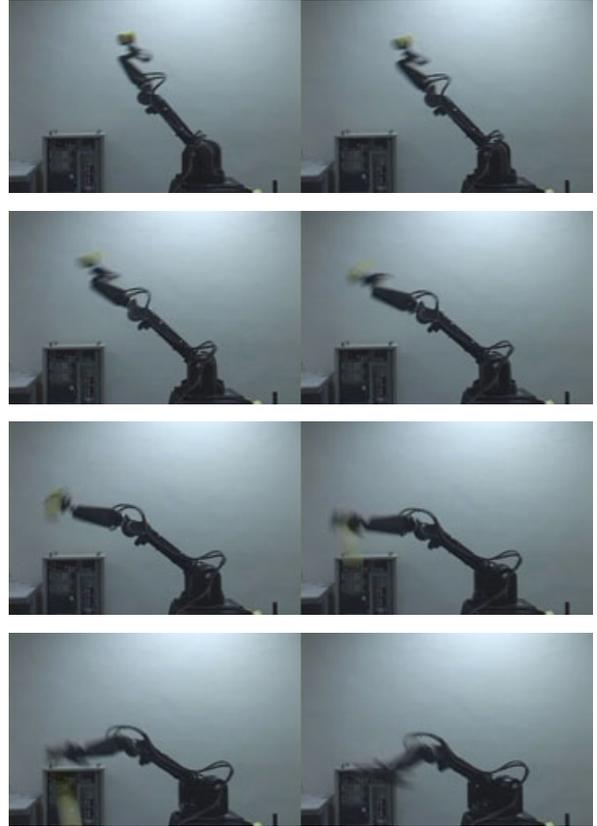


Fig. 2.4 Sequence of pictures

またリリースするまで  $y$  軸と  $z$  軸方向にボールが動かないので以下の条件が成立する．

$$y = \dot{y} = 0, \quad z = \dot{z} = 0 \quad (14)$$

式 (13)(14) を運動方程式 (12) へ代入すると，転がりのダイナミクスは

$$\ddot{x} = \frac{5}{7} \{-\alpha_{0x} + g_x + (\omega_{0y}^2 + \omega_{0z}^2)x\} \quad (15)$$

と表せる．また垂直抗力は以下ようになる．

$$F_y = m \{\ddot{y}_0 - g_y + 2\omega_{0z}\dot{x} + (\dot{\omega}_{0z} + \omega_{0z}^2)x\} \quad (16)$$

垂直抗力  $F_y$  はロボットの運動状態によって 0 より小さくなることもあるので，ボールのリリースの方法は 2 種類存在することになる．1 つはボールが指先リンク上で運動している途

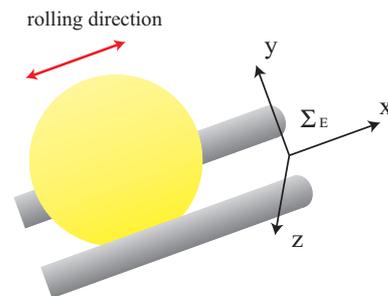


Fig. 3.1 Rolling model

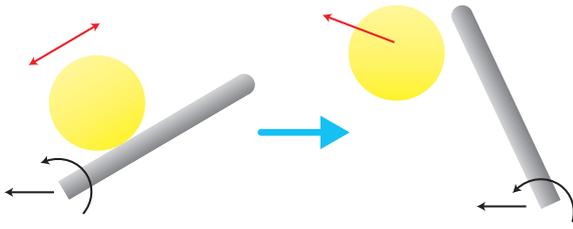


Fig. 3.2 Simulation Setting

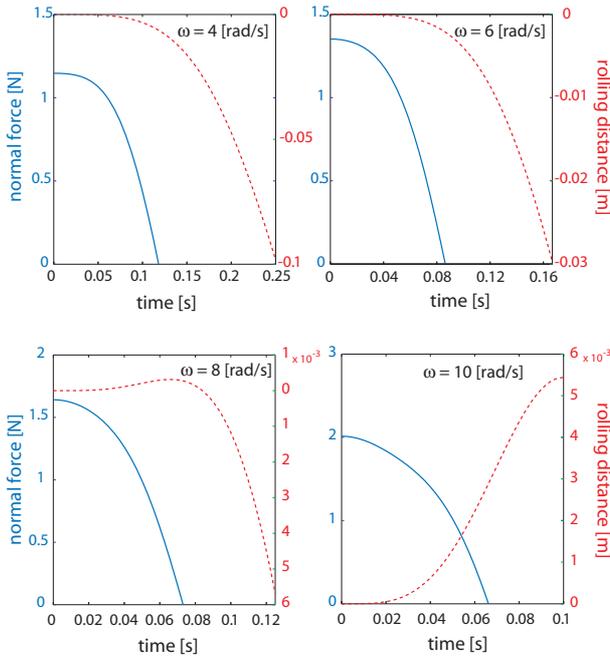


Fig. 3.3 Shift in ball state for angular velocity

中に垂直抗力が存在しなくなって押し出すようにリリースする投げ方であり、もう1つは指先を転がって先端からリリースする投げ方である。次節でこの運動について解析する。

3-2 解析 Fig.3.2のように指先リンクが式(2)で表される正弦波で回転しながら、その回転軸が平面内で並進加速しているモデルを考える。

並進加速運動なしで回転角速度を変化させたときの垂直抗力と転がり距離を Fig.3.3 に示す。角速度が  $\omega = 4, 6$  [rad/s] のときは回転速度が遅いため重力の影響が支配的になり、リンクの負方向に転がっている。角速度を大きくするにつれて見かけの力が大きくなり、指先の転がり方向が正方向に切り替わる様子がわかる。垂直抗力の時系列形状は単調減少で角速度にあまり依存しないが、角速度が大きくなるにつれてその絶対値は大きくなっている。また垂直抗力が0となる時刻までの転がり距離は数 [mm] 程度である。

指の回転角速度を一定にして軸位置を加速させたときの垂直抗力と転がり距離を Fig.3.4 に示す。加速度が増加するにつれて転がり速度が増加するため、転がり距離が長くなる様子がわかる。垂直抗力はある時刻まで増大してそこから0へ向かう極値をもつ時系列形状になる。さらに加速度を大きくする

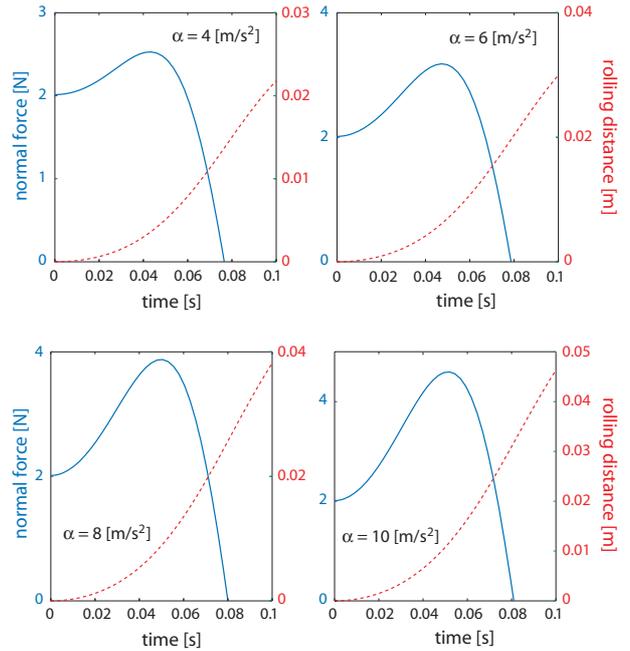


Fig. 3.4 Shift in ball state for acceleration

と垂直抗力の極大値が大きくなっていく。また垂直抗力が0となる時刻までの転がり距離は数 [cm] 程度まで増加し、ロボットハンドの一般的な指リンク長のオーダー程度となる。

3-3 考察 アームとハンドのそれぞれのリンク長および発生可能なパワーを考えると、手先の並進速度・加速度には体幹に近いアームの運動が大きく影響し、手先の角速度・角加速度には先端に近いハンドの運動が大きく影響する。よって指先の先端からリリースする投球方法の場合には手先の並進加速度を大きくする必要があるので、ボールのコントロールにはアームの運動も考慮する必要性がある。

また、速い運動をしてもボールが指上を転がる距離は数 [cm] 程度である。この原因は指の回転速度を大きくするとボールの転がり速度が大きくなる反面、指の動作が終了するまでの動作時間は短くなるために結局は転がり距離はそれほど大きくなりえないといえる。

#### 4. まとめ

波動の重ね合わせに基づき高速な運動を生成するための戦略を提案し、投球動作で波動の伝播効果を検証した。また、投球ボールをコントロールするための転がりモデルを解析した。現在は基準波形として正弦波を用いているが、ロボットのダイナミクスやボールのコントロールまで考慮した軌道生成に改善することや、投球ボールの方向制御を実験することが今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 松浪, 内藤. 運動と脳. サイエンス社, pp.23-27, 2000.
- 2) 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.
- 3) 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, pp.262-268, 2004.
- 4) 妹尾, 並木, 石川. 高速スローイング動作におけるエネルギー伝播の解析. 第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.736-737, 2006.