

野球打撃のインパクト時における打者が加える衝撃力およびボールの角運動量保存を考慮した3次元軌道解析

○味岡 晃生 Nguyen Tam 平田 研二 (富山大学)

3D Trajectory Analysis of the Baseball Ball Considering the Impact Force Applied by the Batter and the Conservation of the Angular Momentum of the Ball at the Time of the Impact

*Kousei Ajioka, Tam W. Nguyen, Kenji Hirata (Toyama University)

Abstract: This paper proposes a 3D model trajectory for a baseball ball that takes into account the impact force applied by the batter at the time of impact and the conservation of angular momentum in three-dimensional space. The impact force is decomposed into a normal and tangential force, which influence the translational motion of the ball and the rotational dynamics of the ball, respectively. The initial condition of the post-collision ball angular velocities are calculated based on this principle. Finally, simulations of the proposed model are conducted, and the validity of the model is verified by comparing it with data from real ball trajectories.

Keywords: Impact Force, Angular Momentum Conservation, Simulation

1 はじめに

近年、スポーツ業界では情報技術の導入やデータ解析によって、選手個々の成長や勝利のための新しい知識の確立が進んでおり、その結果、スポーツの複雑さも増してきている。選手の指導はどのスポーツにおいても非常に重要であるが、従来の監督やコーチの指導だけでは限界がある。そのため、選手の育成を支援するための機械の開発が求められている。

野球業界でもこの傾向が顕著で、その一例としてピッチングマシンが挙げられる。ピッチングマシンに関する研究 [1, 2] も報告されており、現在のピッチングマシンはバリエーション豊富な球種や精度の高い投球こそ出来るものの、投手のシステムしか考えられていない。将来的には打者とピッチングマシンの連携が期待される。例えば、カメラを使用して打者のスイングや打球を分析することで、自身の弱点と改善の余地を明確に理解できることや、ピッチングマシンは打球をもとに自身の投球を改善することで、より精密な球種やコースを提供できるようになる。このような背景から、投手と打者の相互作用を含むシステム全体のモデル化が重要である。

以前提案したモデル [3] は、シミュレーション結果と現実の打球軌道を比較した結果、飛距離が現実の軌道に及ばないことが明らかになり、現実的な打球を予測するモデルとは言えないことがわかった。そのため、本研究では新たなモデルを提案する。この新しいモデルには、打者が加える衝撃力とボールの角運動量保存

が考慮されている。打者が加える衝撃力を考慮することで、衝突時にボールに加わる力が増加し、飛距離が伸びることが期待される。また、ボールの角運動量保存を考慮することで、衝突後のボールの回転が変化し、揚力が発生して飛距離が伸びる可能性がある。実際に、これら2つの現象の相乗効果を活用することで、飛距離と高さを調節することが可能となる。その結果、新しいモデルは以前のモデルよりも現実的な飛距離と高さを予測することが期待される。

その上、野球における打球軌道の研究は他の研究 [4, 5] でも行われているが、これらの研究は衝突現象を2次元空間で扱うか、打者がボールに加える力を考慮していない場合がある。本研究では3次元空間における角運動量保存に基づいた現象や、衝突時に打者がボールに加える力を考慮したモデルを提案し、実際の打球軌道との比較や解析を行う。

以下に本論文の概要を示す。2章では、本論文で提案するモデルに関する説明を行う。打者が加える衝撃力について考察し、衝突時にその衝撃力がボールにどのように作用するかを運動方程式を用いて説明する。また、角運動量保存の現象を考慮することで、衝突直後のボールの角速度の計算についても説明する。3章では、提案モデルの数値シミュレーションを行い、前モデルとの比較やパラメータの違いによる軌道の変化を解析する。また、文献の打球データや現実の打球軌道との比較を行うことで提案モデルの妥当性と現実性を検証する。

2 提案モデル

本章では、打者が加える力と角運動量保存の現象を考慮した提案モデルについて説明する．具体的には、打者が加える衝撃力を打球の並進距離に影響する力と回転に影響する力に分解し、並進距離に影響する力についてはボールとバットの接触時間における運動方程式を考え、回転に影響する力については角運動量保存の原理に基づいて衝突後の角速度の初期値を計算することで、これら2つの現象を考慮する．

2.1 打者が衝突時に加える衝撃力

Fig. 1 は衝突した瞬間の衝突点におけるバットのスイングスピードを表したものである．衝突した瞬間のバットのスイングスピードは並進運動による $\vec{v}_p$ と、回転運動による $\vec{v}_\omega$ に分解する．角速度ベクトルを $\vec{\omega}_{bat}$ 、バットの末端から衝突点までのベクトルを $\vec{r}_{bat}$ とすると、 $\vec{v}_\omega$ は

$$\vec{v}_\omega = \vec{\omega}_{bat} \times \vec{r}_{bat} \quad (1)$$

で求められる．ここで、合成速度を

$$\vec{v}_t = \vec{v}_p + \vec{v}_\omega \quad (2)$$

とする．また、 $\vec{v}_t$ は Fig. 2 の衝撃力の合成 $\vec{F}$ と同じ方向だと仮定すると

$$\frac{\vec{v}_t}{|\vec{v}_t|} = \frac{\vec{F}}{|\vec{F}|} \quad (3)$$

となる．ここで、 $\vec{F}$ を基準座標系でバットの衝突面に垂直な成分 $\vec{F}_N = [F_{Nx} F_{Ny} F_{Nz}]^T \in \mathbb{R}^3$ と水平な成分 $\vec{F}_F \in \mathbb{R}^3$ に分解する． $\vec{F}_N$ はボールの並進運動、 $\vec{F}_F$ はボールの回転運動にのみ影響する．

質量 $m \in \mathbb{R}_{>0}$ のボールが気体中を飛翔している時、このボールの運動方程式は

$$m\ddot{x} = D_x + L_x \quad (4)$$

$$m\ddot{y} = D_y + L_y \quad (5)$$

$$m\ddot{z} = D_z + L_z - mg \quad (6)$$

で表されるが、衝突した瞬間、ボールとバットの接触時間 $\Delta t = 1.0 \text{ ms}$ 間 [6] の運動方程式は

$$m\ddot{x} = D_x + L_x + F_{Nx} \quad (7)$$

$$m\ddot{y} = D_y + L_y + F_{Ny} \quad (8)$$

$$m\ddot{z} = D_z + L_z - mg + F_{Nz} \quad (9)$$

となる．ここで、重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 抗力 $\vec{D} = [D_x D_y D_z]^T \in \mathbb{R}^3$ 、揚力 $\vec{L} = [L_x L_y L_z]^T \in \mathbb{R}^3$ とし

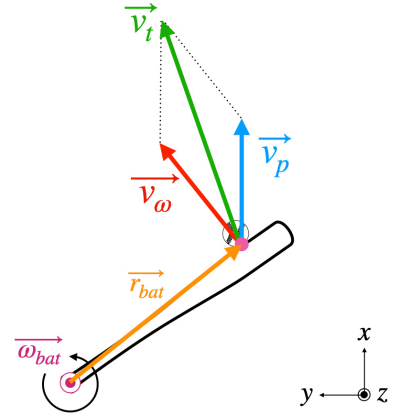


Fig. 1: Velocity $\vec{v}_t$ decomposed by $\vec{v}_\omega$, the linear velocity generated by $\vec{\omega}_{bat}$, and $\vec{v}_p$, the pure linear velocity at the point of impact.

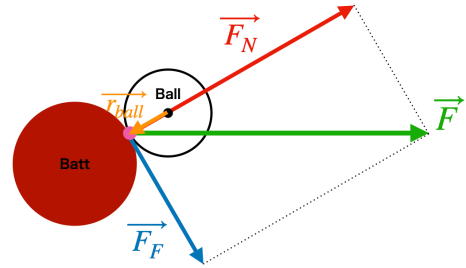


Fig. 2: Decomposition of $\vec{F}$ as of $\vec{F}_N$ and $\vec{F}_F$, which are the normal and the tangential force components, respectively.

ている（詳細は [3] を参照）．

Fig. 2 のようにボール中心から衝突点に向かうベクトルを $\vec{r}_{ball} \in \mathbb{R}^3 \text{ (m)}$ とすると、ボールにかかるトルク $\vec{\tau}$ は

$$\vec{\tau} = \vec{r}_{ball} \times e_F \vec{F}_F \quad (10)$$

で表される．ここで、 e_F を摩擦係数とし、摩擦による $\vec{F}_F$ の損失を調整するパラメータとする．トルク $\vec{\tau}$ によってボールの回転は時変の値になるので微分方程式

$$\dot{\vec{\omega}} = J^{-1}(\text{skew}(J\vec{\omega})\vec{\omega} + \vec{\tau}) \quad (11)$$

で解く．ここで、角速度 $\vec{\omega} = [\omega_x \omega_y \omega_z]^T \in \mathbb{R}^3$ 、慣性モーメント $J \in \mathbb{R}_{>0}^{3 \times 3}$ を表している．ボールの姿勢を表す回転行列 $R(t)$ を

$$\dot{R}(t) = \text{skew}(\vec{\omega})R(t) \quad (12)$$

を用いて計算する．衝突時におけるボールの姿勢を $R(0)$ としている．また、

$$\text{skew}(\vec{\omega}) \triangleq \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

と定義する．本研究では (10)-(13) 式を用いて、 $\vec{\omega} = \vec{\omega}_{ball}$ 、 $J = I_{ball}$ として計算する．

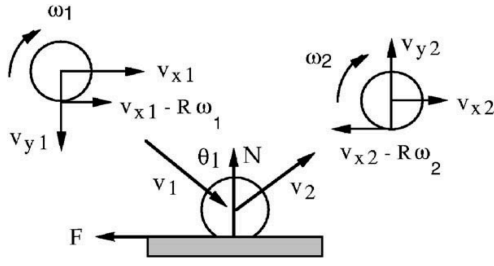


Fig. 3: Ball bouncing motion [7].

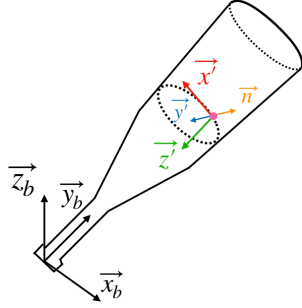


Fig. 4: Coordinate system $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ attached to the bat at the impact point.

2.2 角運動量保存則

Fig. 3 のように半径 r のボールが角速度 ω_1 , 速度 v_1 で入射して, 角速度 ω_2 , 速度 v_2 で跳ね返ってきた時, ボールの衝突点では角運動量保存則 [7]

$$I\omega_1 + mrv_{x1} = I\omega_2 + mrv_{x2} \quad (14)$$

が成り立つ. ここで, v_{x1}, v_{x2} は衝突面に対して水平な速度成分である. また, $I = amr^2$ はボールの慣性モーメントを表している. 野球ボールの場合 $a = 0.378$ が当てはまる [8].

2.3 3次元空間への拡張

(14) 式を 3 次元空間に拡張するために, Fig. 4 のようにバットの末端を原点とする座標を $\vec{x}_b, \vec{y}_b, \vec{z}_b$ として, $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ 座標系を次のように定義する.

$$\vec{y}' = -\vec{n} \quad (15)$$

$$\vec{z}' = -\vec{y}_b \quad (16)$$

$$\vec{x}' = \vec{y}' \times \vec{z}' \quad (17)$$

ここで衝突点のバット表面における単位法線ベクトルを $\vec{n} \in \mathbb{R}^3$ としている. 衝突点における基準座標系に対して回転させた $(\vec{x}', \vec{y}', \vec{z}')$ の回転行列は

$$R' = \begin{bmatrix} \vec{x}' & \vec{y}' & \vec{z}' \end{bmatrix} \quad (18)$$

で与えられる.

基準座標系での衝突前のボール速度を $\vec{v}_{ball} \in \mathbb{R}^3(\text{m/s})$, 角速度を $\vec{\omega}_1 \in \mathbb{R}^3(\text{rad/s})$, 衝突直後のボール速度を $\vec{v}'_{ball} \in \mathbb{R}^3(\text{m/s})$ とする. その時, 衝突点の座標系での衝突前のボールの速度 $\vec{v}'_{ball} \in \mathbb{R}^3(\text{m/s})$, 角速度 $\vec{\omega}'_1 \in \mathbb{R}^3(\text{rad/s})$, 衝突直後のボールの速度 $\vec{v}'_{ball} \in \mathbb{R}^3(\text{rad/s})$ は

$$\vec{v}'_{ball} = \begin{bmatrix} v'_{ball_x} & v'_{ball_y} & v'_{ball_z} \end{bmatrix}^T = R'^T \cdot \vec{v}_{ball} \quad (19)$$

$$\vec{\omega}'_1 = \begin{bmatrix} \omega'_{1_x} & \omega'_{1_y} & \omega'_{1_z} \end{bmatrix}^T = R'^T \cdot \vec{\omega}_1 \quad (20)$$

$$\vec{v}'_{ball} = \begin{bmatrix} \tilde{v}'_{ball_x} & \tilde{v}'_{ball_y} & \tilde{v}'_{ball_z} \end{bmatrix}^T = R'^T \cdot \vec{v}_{ball} \quad (21)$$

となる. 式 (19)-(21) を用いて, 式 (14) を 3 次元空間に拡張すると, 衝突直後の角速度 $\vec{\omega}'_2 = \begin{bmatrix} \omega'_{2_x} & \omega'_{2_y} & \omega'_{2_z} \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^3$ は

$$\omega'_{2_x} = \left(\omega'_{1_x} + \frac{m \|\vec{r}_{ball}\| v'_{ball_z} - m \|\vec{r}_{ball}\| \tilde{v}'_{ball_z}}{I} \right) \quad (22)$$

$$\omega'_{2_y} = \omega'_{1_y} \quad (23)$$

$$\omega'_{2_z} = \left(\omega'_{1_z} + \frac{m \|\vec{r}_{ball}\| v'_{ball_x} - m \|\vec{r}_{ball}\| \tilde{v}'_{ball_x}}{I} \right) \quad (24)$$

で計算される. 実際の衝突現象は反発係数 $e \in (0, 1]$ が掛かるため, 角速度 $\vec{\omega}'_2$ は

$$\vec{\omega}'_2 = e \vec{\omega}'_2 \quad (25)$$

となる. よって基準座標系での衝突直後の角速度 $\vec{\omega}'_2$ は

$$\vec{\omega}'_2 = R' \cdot \vec{\omega}'_2 \quad (26)$$

となる. この値をボールとバットの接触時間 Δt 間で解く微分方程式 (11) の初期値にする.

3 シミュレーション解析

本章では, 提案モデルの数値シミュレーションを行い, パラメータの違いによる軌道の変化や前モデルとの比較をし, 計算された打球を解析する. また, 文献の打球データや現実の打球軌道との比較を行うことで提案モデルの妥当性を検証する.

3.1 衝撃力の影響

打者が加える衝撃力 $\|\vec{F}\|$ を 1000N から 7000N まですべて 2000N 刻みで変更してシミュレーションを行う. さらに, 衝撃力を考慮していない前モデルとの比較も行う. シミュレーションで用いた変数は Table 1 に示されており, これらの値は早稲田大学の硬式野球部の部員らによって測定された値 [9] を参考にして調整した. (変数や記号の詳しい定義については [3] を参照)

Table 1: Parameters of the simulation of the pitcher-batter system.

説明	変数	値
初速度 (ボール)	v_0 (m/s)	33.2
ボール回転数	N_0 (rps)	-37
ボール方向の偏角	θ_{v_0} ($^\circ$)	0
ボール方向の偏角	ϕ_{v_0} ($^\circ$)	0
ボール回転軸の偏角	$\theta_{\vec{\omega}_n}$ ($^\circ$)	0
ボール回転軸の偏角	$\phi_{\vec{\omega}_n}$ ($^\circ$)	0
角速度 (バット)	ω_{bat} (rad/s)	40
バットの並進速度	$\vec{v}_{bat} = [v_{batx} \ v_{baty} \ v_{batz}]^T \in \mathbb{R}^3$ (m/s)	$[10 \ 0 \ 5]^T$
バット初期姿勢の偏角	θ_{bat} ($^\circ$)	60
バット初期姿勢の偏角	ϕ_{bat} ($^\circ$)	30
バット回転軸の偏角	θ_{rot} ($^\circ$)	-90
バット回転軸の偏角	ϕ_{rot} ($^\circ$)	70
スイング開始時間	(s)	0.46
ボールの初期位置	$\vec{p}_{ball} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$ (m)	$[16.42 \ 0 \ 1.69]^T$
バットの初期位置	$\vec{p}_{bat} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$ (m)	$[0 \ 0.6 \ 0.925]^T$
摩擦係数	e_F	0.25

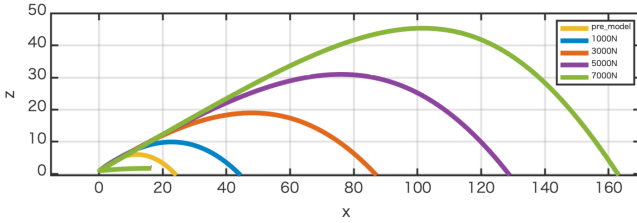


Fig. 5: Ball trajectory viewed from the side.

結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 は打球軌道を横（一塁側）から見た図となっている。打球は x 軸上（センター方向）に飛んでいる。打者が加える衝撃力が大きくなるにつれて打球の飛距離は伸びていることが観察される。前モデルと比較すると、衝撃力が 1000N の場合、飛距離は約 2 倍、3000N の場合は約 4 倍、5000N の場合は約 6 倍、7000N の時は約 8 倍の差が生じている。この結果から打者がボールに対して加える衝撃力は打球に大きな影響を与えることが確認できる。また、プロ選手の場合、実際のホームラン軌道を考えると、センター方向への打球の時、フェンスを越えるためには約 120m の飛距離が必要である。今回のシミュレーションでは一番飛距離が出る衝突位置に調整していることを踏まえると、衝撃力 $\|\vec{F}\|$ は約 130m 飛んでいる 5000N 付近が妥当であると言える。ただし、この値は打者の個々の力に影響されるため、プレイヤーによって調整すべきパラメータである。打者が加える衝撃力に関しては様々な研究 [10]-[13] が報告されている。特に野球経験のない人が「70~80 %の力を込めた」と説明したときの最大衝撃力は 2400N であったという報告もある [11]。そのため、プロの選手が 5000N 程度の衝撃力を加える可能性は十分に考えられる。

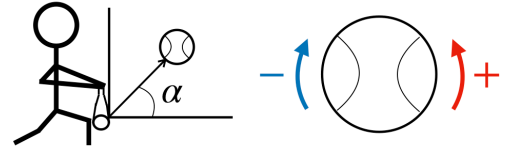


Fig. 6: Definition of the hitting angle α and direction of ball rotation.

Table 2: Parameters of the simulation of the pitcher-batter system.

説明	変数	値
初速度 (ボール)	v_0 (m/s)	33.2
ボール回転数	N_0 (rps)	-37
ボール方向の偏角	θ_{v_0} ($^\circ$)	0
ボール方向の偏角	ϕ_{v_0} ($^\circ$)	0
ボール回転軸の偏角	$\theta_{\vec{\omega}_n}$ ($^\circ$)	0
ボール回転軸の偏角	$\phi_{\vec{\omega}_n}$ ($^\circ$)	0
角速度 (バット)	ω_{bat} (rad/s)	40
バットの並進速度	$\vec{v}_{bat} = [v_{batx} \ v_{baty} \ v_{batz}]^T \in \mathbb{R}^3$ (m/s)	$[10 \ 0 \ 0]^T$
バット初期姿勢の偏角	θ_{bat} ($^\circ$)	60
バット初期姿勢の偏角	ϕ_{bat} ($^\circ$)	30
バット回転軸の偏角	θ_{rot} ($^\circ$)	-90
バット回転軸の偏角	ϕ_{rot} ($^\circ$)	70
スイング開始時間	(s)	0.46
ボールの初期位置	$\vec{p}_{ball} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$ (m)	$[16.42 \ 0 \ 1.69]^T$
摩擦係数	e_F	0.25
打者が加える衝撃力	$\ \vec{F}\ $ (N)	5000

3.2 衝突後の回転

バットの初期位置を調整することによって、衝突位置を変え、異なる打球角度でのシミュレーションを行う。その後、衝突後のボールの回転数に関するシミュレーション結果と実測値を比較する。実測値はスイングとインパクトが打球に与える影響について調査された研究 [9] の結果を引用する。さらに、前モデルとの比較も行い、角運動量保存と摩擦係数 e_F を考慮した際の衝突後の回転への影響を解析する。

打球角度とボールの回転方向の定義は Fig. 6 に示す。ボールが飛んでいく方向と地表面との角度を α とし、ボールを横（一塁側）から見た時、左回りを正、右回りを負とした。シミュレーションで用いた変数は Table 2 に示す。これらの値は、文献で測定された環境 [9] と一致するように調整している。また、衝突後の回転数を N (rps) とする。

結果を Table 3 に示す。前モデルでは衝突時における回転に影響する現象を考慮していなかったため、衝突後の回転は衝突前と同じ結果になった。一方、提案モデルでは、どの打球角度においても回転数と回転方向の両方が実測値の範囲内に収まる結果が得られた。打球角度に関わらず、範囲内の中央値に近い回転数が観測され、この結果から角運動量保存と摩擦係数の考慮によって、実際の衝突後の回転数と回転方向を現実的に模擬できたとと言える。

Table 3: Comparison of the proposed model and the previous model with actual measurements.

$\alpha(^{\circ})$	実測値 $N(\text{rps})$	前モデル $N(\text{rps})$	提案モデル $N(\text{rps})$
40	40~70	-37	61
30	30~60	-37	43
15	0~40	-37	11
0	-40~10	-37	-19
-15	-60~-20	-37	-52
-30	~-60	-37	-87

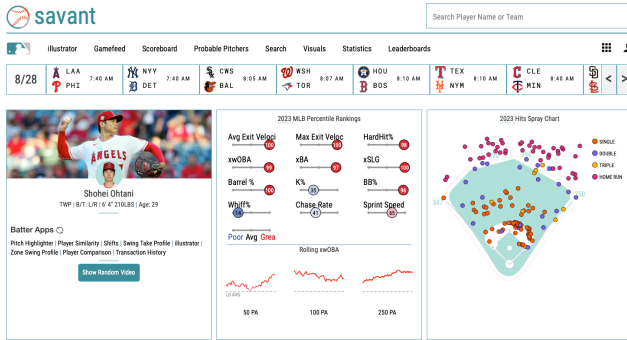


Fig. 7: Statcast [14].

3.3 現実の打球軌道を再現

提案モデルのパラメータを調整することで、現実の打球軌道をシミュレーションによって再現する。打球軌道のデータは、Statcast [14] と呼ばれる、MLB で導入されているデータ解析ツールから取得した。Statcast とは MLB の全ての本拠地球場に導入されているステレオカメラやレーダーを使用して選手やボールの動きを高速・高精度に分析するためのものである。Fig. 7 のように測定された詳細なデータは MLB のサイトに公開されている。

今回、2023 年 4 月 26 日 (現地時間) にロサンゼルス・エンゼルスに所属している大谷翔平選手がオークランド・アスレチックス戦で放った、第 6 号ホームランを再現する。そのため、Statcast の数あるデータの中から、打球速度 (Exit Velocity), 最高到達点 (Height), 打球角度 (LA), 飛距離 (Dist), 投球速度 (Velocity) を使用する。打球速度, 最高到達点, 打球角度, 投球速度がデータと一致するようにバットの初期姿勢, 初期位置, スイング開始時間, バットの並進速度を調整し、打球の飛距離を比較した。設定した変数を Table 4 に示す。

シミュレーションによる打球軌道の結果を Fig. 8, 9 に、シミュレーション結果と Statcast のデータの比較を Table 5 に示す。Fig. 8 はシミュレーションで得られた打球軌道を上から見た図で、Fig. 9 は横 (一塁側)

Table 4: Parameters of the simulation of the pitcher-batter system.

説明	変数	値
初速度 (ボール)	v_0 (m/s)	42.2
ボール回転数	N_0 (rps)	-37
ボール方向の偏角	θ_{v_0} ($^{\circ}$)	0
ボール方向の偏角	ϕ_{v_0} ($^{\circ}$)	0
ボール回転軸の偏角	θ_{ω_n} ($^{\circ}$)	0
ボール回転軸の偏角	ϕ_{ω_n} ($^{\circ}$)	0
角速度 (バット)	ω_{bat} (rad/s)	40
バットの並進速度	$\vec{v}_{bat} = [v_{bat_x} \ v_{bat_y} \ v_{bat_z}]^T \in \mathbb{R}^3$ (m/s)	$[10 \ 0 \ 2]^T$
バット初期姿勢の偏角	θ_{bat} ($^{\circ}$)	120
バット初期姿勢の偏角	ϕ_{bat} ($^{\circ}$)	30
バット回転軸の偏角	θ_{rot} ($^{\circ}$)	-90
バット回転軸の偏角	ϕ_{rot} ($^{\circ}$)	-70
スイング開始時間	(s)	0.466
ボールの初期位置	$\vec{p}_{ball} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$ (m)	$[16.42 \ 0 \ 1.69]^T$
バットの初期位置	$\vec{p}_{bat} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$ (m)	$[0 \ -0.58 \ 0.916]^T$
摩擦係数	e_F	0.25
打者が加える衝撃力	$\ \vec{F}\ $ (N)	5000

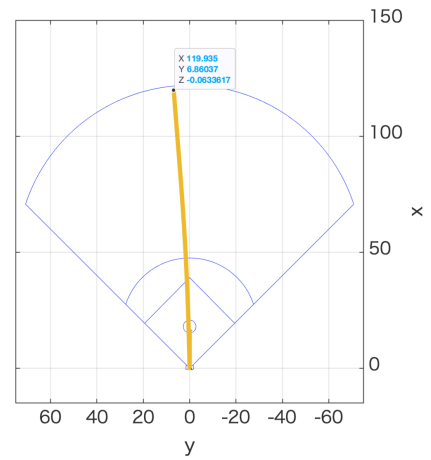


Fig. 8: Ohtani's home run in the simulation (Top).

から見た図である。青線は名古屋市にあるバンテリンドーム ナゴヤの寸法に基づくグラウンドを示している。打球速度, 最高到達点, 打球角度を一致させた場合、飛距離は実測データの 122.2m に対して、シミュレーションでは 120.1m という結果が得られた。この 2m の差は、測定値に対して約 1/100 程度であり、誤差の範囲内に収まっていると考えられる。なお、この誤差には風などの外部要因が影響している可能性もあるが、提案モデルが現実の打球軌道を再現するために有効であることが示唆される。これにより、提案モデルの変数を適切に調整することで、現実の打球の軌道を正確に再現できると言える。

4 おわりに

本研究では、衝突時に打者が加える衝撃力と 3 次元空間における角運動量保存に基づいた現象を考慮したモデルを提案した。具体的には、打者が加える衝撃力の方向を定義し、打球の並進距離に影響する力と回転

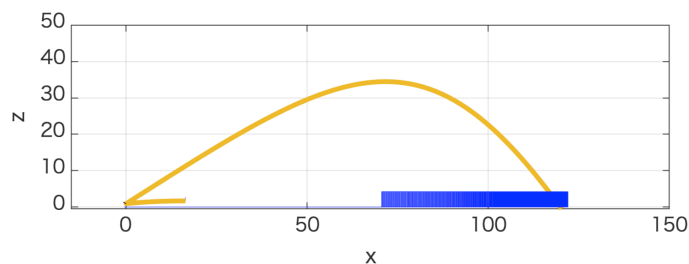


Fig. 9: Ohtani's home run in the simulation (Side).

Table 5: Comparison of Ohtani's home run data with simulation results.

	Exit velocity(MPH)	Height (m)	LA(°)	Dist(m)
Data	103.9	34.4	34	122.2
Simulation	103.8	34.4	34	120.1

に影響する力に分解した。並進距離に影響する力についてはボールとバットの接触時間における運動方程式を考慮し、回転に影響する力については従来は2次元空間で考えられていた角運動量保存則を3次元空間に拡張し、その原理に基づいて衝突後のボール角速度の初期値を計算した。これにより、これら2つの現象を統合的に考慮したモデルを提案した。

次に、この提案モデルを用いて数値シミュレーションを行い、衝撃力を変えた場合の結果と衝撃力を考慮していない前モデルとの比較をすることで、衝撃力の影響を解析した。さらに、異なる打球角度での回転数をシミュレーション結果と文献データと比較することで提案モデルの妥当性を検証した。最後に、提案モデルが現実の打球軌道を再現することを示し、適切にパラメータを調整することで実際の軌道を正確に再現できる可能性を示した。

文献データやサイトから入手したデータとの比較を行なったが、投球されたボールの詳細なデータ、例えば、回転数や回転軸、また、スイングスピードなどの情報を入手することは難しい場合もあり、得られるデータの種類には制限がある。そのため、今後の展望として、球速、回転数、回転軸などが計測できるセンサー内蔵型ボールやスイングスピードやスイング軌道などを計測できるスイング解析センサーを活用して、自ら計測したデータと提案モデルのシミュレーション結果を比較していく。これにより、より正確なデータを用いた検証を行うことができ、提案モデルの妥当性や改善の余地を詳細に検討することが可能になる。

参考文献

[1] 酒井, 北河, 金井, 尾田: ローラ式ピッチングマシンの投球シミュレーションとその最適化に関する

研究; 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.12, pp.2864-2869 (2008)

[2] 酒井: 野球用ローラ式ピッチングマシンのトライポロジー; トライポロジスト, Vol.58, No.1, pp.24-29 (2013)

[3] 味岡, Nguyen, 平田: 弾性衝突とエネルギー保存の原理を用いたボールとバットの 衝撃相互作用および 3 次元軌道モデリング; 第 65 回自動制御連合講演会論文集, pp. 1392-1399 (2022)

[4] 長島, 清原, 高橋: 野球場における防球ネット高さの解析; 東北学院工学部研究報告, Vol.54, No.1, pp.1-11 (2020)

[5] 宮澤, 志村, 城所, 若原, 矢内: 野球のバッティングにおけるインパクトシミュレーション; 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.777, pp.813-822 (2011)

[6] R. Cross: *Physics of Baseball & Softball*, pp. 261-277, Springer Science+Business Media (2011)

[7] R. Cross : Bounce of a spinning ball near normal incidence; *American Journal of Physics*, Vol. 73, No. 10, pp. 914-920 (2005)

[8] Brody H : The moment of inertia of a tennis ball ; *Physics Teacher*, Vol. 43, pp.503-505 (2005)

[9] 城所, 若原, 矢内: 野球のバッティングにおける打球の運動エネルギーを決定するスイングとインパクト; バイオメカニクス研究 16, Vol.4, pp.220-230 (2012)

[10] 大野: 各種飛翔体の衝突時の衝撃力に関する試験; 防衛大学校研究報告書, Vol. 1, pp.1-7 (2010)

[11] 自転車産業振興協会 研究指導部: 続々・自転車が衝突するとき一衝撃力の大きさ; 技研ニュース, No. 174, pp.2 (2000)

[12] Shenoy M M, Smith L V, Axtell J T: Performance assessment of wood, metal and composite baseball bats ; *Composite Structures*, Vol. 52, pp. 397-404 (2001)

[13] Daniel A. Russell : Physics of Baseball and Softball Bats; <https://www.acs.psu.edu/drussell/bats.html>

[14] https://baseballsavant.mlb.com/statcast_leaderboard