

# 投てき型作業システムの飛行制御に関する研究

浦池 隆文

## Study on Flight Control of Casting-type Work Support System

Takafumi URAIKE

キーワード：屋外作業，投てき，飛行，張力制御

### 1. はじめに

現在一般的に用いられている各種屋外作業システムは、固定式又は車輪やクローラーによる移動式の本体に、リンク機構と作業機を組み合わせたものが主流であるが、リンク寸法や移動経路の状態により作業可能な範囲が制限される。また、作業範囲の拡大にはリンクの延長や関節数の増加による重量の増加に伴い、より高出力なアクチュエータを必要とすることから、製作コストが大幅に増大する。

そこで本研究では、「投げ釣り」や「投げ縄」に類するキャスト機構（独産業技術総合研究所にて開発<sup>1)~4)</sup>を活用した投てき型作業システムに関して、作業範囲の拡大と精密な動作を可能とする制御法について検討した。この中で、3D-CADによる構造設計と機構解析を用いた投てき動作計画を行い、エンコーダやポテンショメータ等の内界センサによる飛行状態の計測・制御手法を開発した。また、三点ローラー式張力センサとワイヤーリールのダイレクト駆動による張力制御機構を備えた投てき試験装置を試作し、本装置による投てき試験を通じて、投てき動作の妥当性確認と、投てき精度の評価を行った。

### 2. 振り運動を用いた投てき動作

#### 2.1 キャスティング機構の概要

図1にキャスト機構の構成、および図2に既存の作業システムとの比較を示す。キャスト機構は、投てき動作を行う剛体リンク部と、投てき後の飛行状態をコントロー

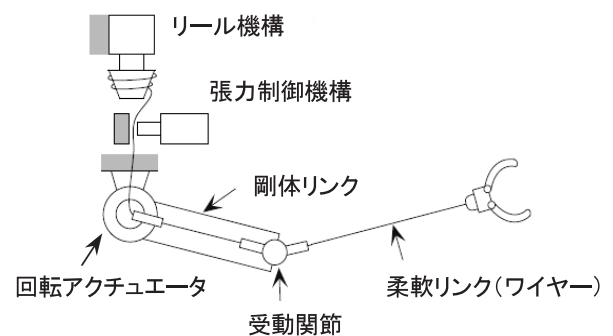


図1 キャスティング機構の構成

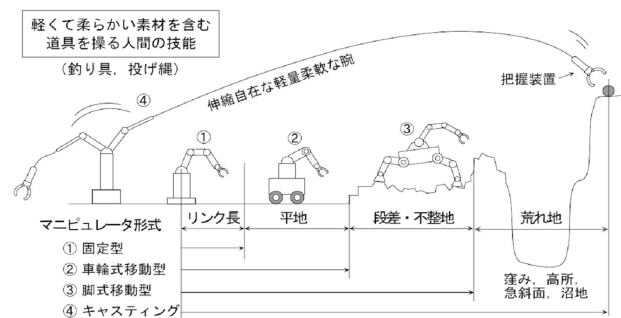


図2 既存のシステムとの比較

ルするための紐状柔軟リンク部（ワイヤー）から構成される。主な可動部が剛体リンクの回転駆動部であり、非常にシンプルで軽量な機構であることから、製作や維持管理にかかるコストを低く抑えられる。また、投てきに必要なエネルギーを回転運動で蓄えるため、高効率である。アーム型のロボットやクレーン車・パワーショベル等の既存の作業機械では到達が困難な地形にも対応できる可能性があり、新たな作業システムとしての利用が期待される。

事業名：外部資金活用研究

課題名：張力制御によるキャスト型作業システムに関する研究

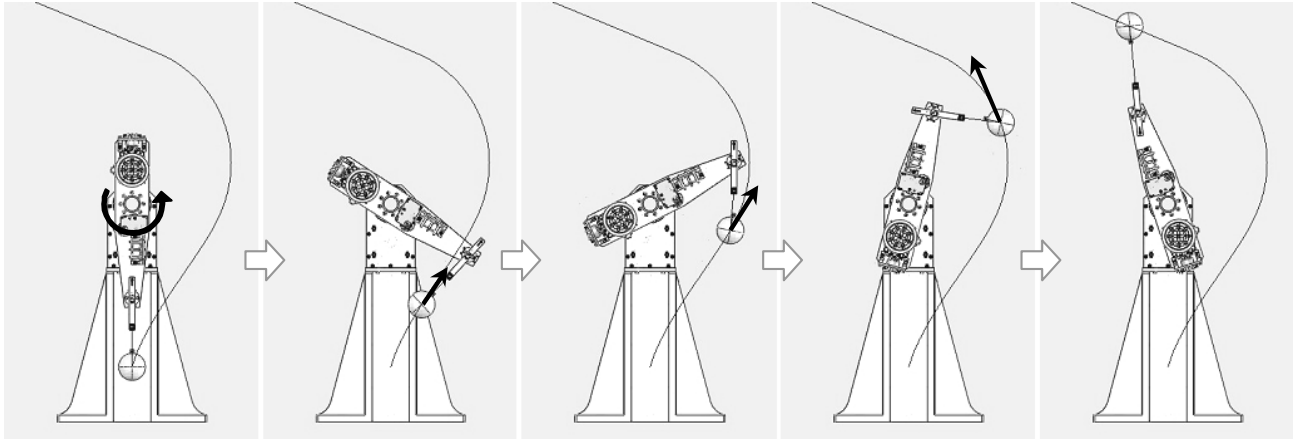


図3 振り子運動による投てき動作

### 2.2 投てき動作のシミュレーション

ワイヤー先端の投てき対象（作業機）は、剛体リンクを駆動する事により、受動関節を中心として、ワイヤーを介した回転運動を行う。投てき法として、図3に示すような振り子運動による振り上げ動作を行うこととし、3D-CADによる設計と機構解析によるシミュレーションを活用することで、効率的な投てき動作条件を検討した。剛体リンクの駆動トルクと、初期状態でのワイヤー長さを変えてシミュレーションを繰り返した結果、振り上げ時の剛体リンクとワイヤーのなす角が概ね90°近くに保たれるように条件を設定することで、効率良く運動エネルギーが蓄えられることを確認した。このときの運動の形態は、図3から想像されるように、野球の投球動作と似たものとなっている。

## 3. 飛行状態の計測と制御法

### 3.1 飛行時の幾何学的関係と内界センサによる計測

投てき後の飛行状態は、図4に示す幾何学的な関係から求められる。この際、剛体リンク角 $\theta_1$ 、ワイヤー角 $\theta_2$ およびワイヤー長さ $l$ を取得する必要があるが、 $\theta_2$ は受動関節部にポテンショメータを設け、 $\theta_1$ と $l$ は、剛体リンクおよびワイヤーリール駆動用モータに内蔵されたエンコーダを用いて計測することとした。各センサにより計測された値から、式(1)

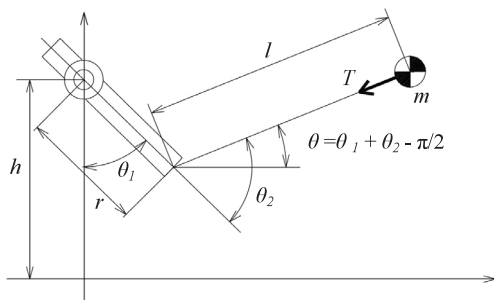


図4 飛行状態の幾何学的関係

より現在の作業機位置が計算され、これを微分することで速度が求められる(式(2))。一方、作業機は式(3)の運動方程式に従い運動する。式(1)、(2)による位置と速度を初期条件とし、式(3)について、式(4-1)、(4-2)に示す数値計算を行うことで、張力 $T$ を作用させた場合の飛行経路を予測できる。

$$\begin{cases} x(t) = r \sin \theta_1 + l \cos \theta \\ z(t) = h - r \cos \theta_1 + l \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ \dot{z}(t) = \frac{z(t) - z(t - \Delta t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} m \ddot{x}(t) = -T \cos \theta \\ m \ddot{z}(t) = -g - T \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t + \Delta t) = \dot{x}(t) + \ddot{x}(t) \Delta t \\ \dot{z}(t + \Delta t) = \dot{z}(t) + \ddot{z}(t) \Delta t \end{cases} \quad (4-1)$$

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + \dot{x}(t) \Delta t \\ z(t + \Delta t) = z(t) + \dot{z}(t) \Delta t \end{cases} \quad (4-2)$$

### 3.2 張力による飛行経路の制御

張力を作用させた時の飛行軌跡のシミュレーション結果を、図5および図6に示す。図5は投射1s後から張力を作用させた場合、図6は張力作用開始時刻を変化させた場合を示している。投てき条件は、質量0.5kg、投てき角45°、初速10m/s、

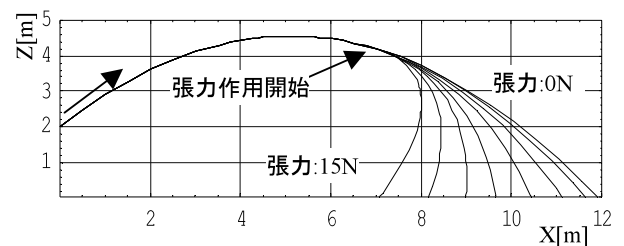


図5 投射1秒後から張力を作用させた場合 (張力 → 0.0 ~ 15.0N)

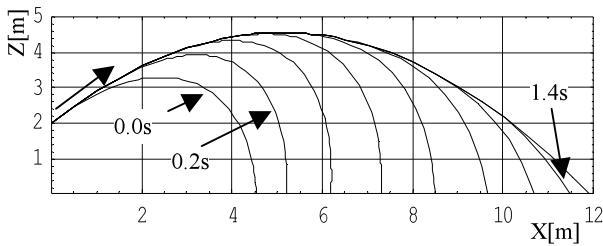


図6 張力作用開始時刻を変化させた場合  
(張力 5 N: 開始時刻 → 0.0 ~ 1.4s)

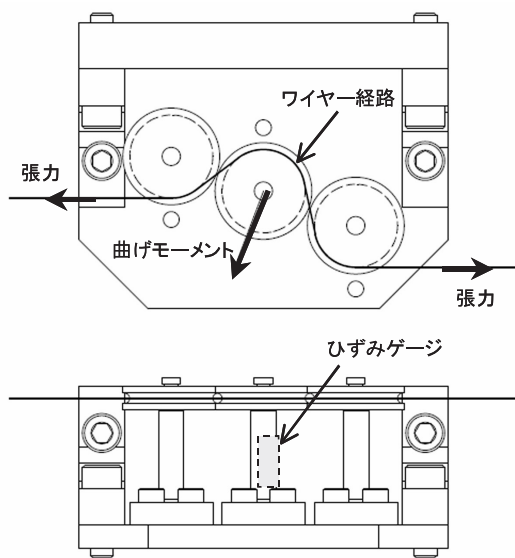


図7 張力センサ部

投てき高さ 2 m で統一した。張力を作用させない場合の到達距離は約 12 m で、およそ 1.7 s 後に着地する。図のように、張力の与え方により様々な飛行経路の生成が可能である。

飛行制御に必要な張力を発生させる機構は、三点ローラー式の張力センサ部と、ワイヤーの繰り出し・巻き取りを行うワイヤーリール部の組み合わせにより構成した。張力センサ部(図7)は、ワイヤー経路に三点のローラーを配置し、中間ローラーの支持軸にひずみゲージを貼り付ける方式とした。ワイヤーに張力が発生すると、中間ローラー軸は曲げモーメントを受ける。このひずみを測定することで、張力を求める。ワイヤーリールは AC サーボモータによるダイレクトドライブ方式とした。張力センサによる測定結果を考慮して、所望の張力を発生するよう、繰り出し・巻き取りトルクを制御する。

#### 4. 投てき試験装置と制御システム

投てき動作および飛行状態の計測・制御法に関する検討結果を踏まえ、試験装置を製作した(図8, 図9)。使用したセンサおよびアクチュエータの主な仕様を表1(次項)に示す。試験装置はLinux互換のリアルタイムOS(RT-Linux)

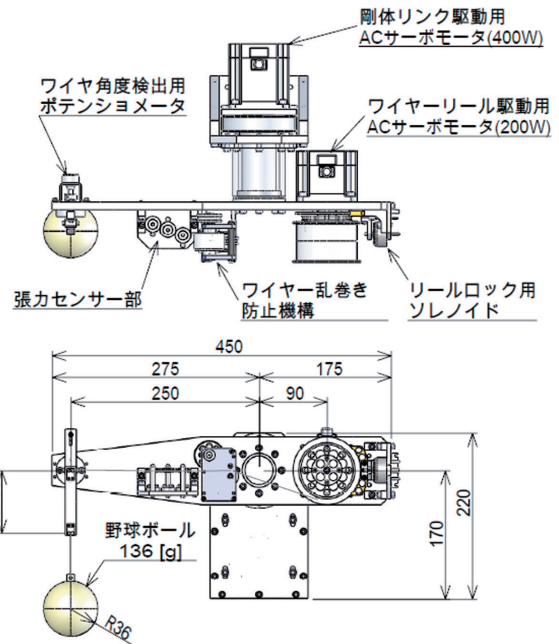


図8 試験装置の概要

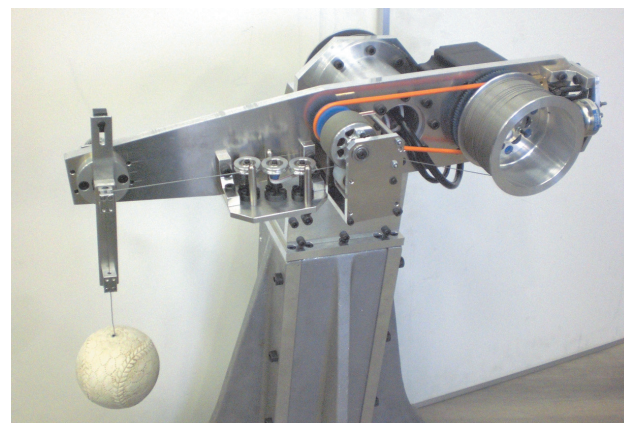


図9 試作した試験装置

により、1ms周期で制御される(図10)。各種センサやアクチュエータとの入出力には、Interface社製PCIバス拡張ボードを用いた。投てき対象として、136gの野球ボールを用いることとし、剛体リンクの駆動に定格出力400WのACサーボモータを用いることで、約20mの投てきが可能な仕様としている。

20mの投てきを想定したシミュレーションの結果、投てきの瞬間には最大で約200Nの張力が作用することが判明した。そこで、これに対応するため、 $\phi 0.4 \sim 0.6$ mmのステンレス製(切断荷重150~300N)撚り線ワイヤーロープを使用することとした。投てきに必要センサおよびアクチュエータ類以外の補助機構として、ワイヤーの乱巻き防止機構と、リールロック用ソレノイドを設けた。乱巻き防止用ローラーは、丸ベルトを介してワイヤーリールと同期して駆動される。ローラーの周速がリールの周速より若干速くなるようプーリー比

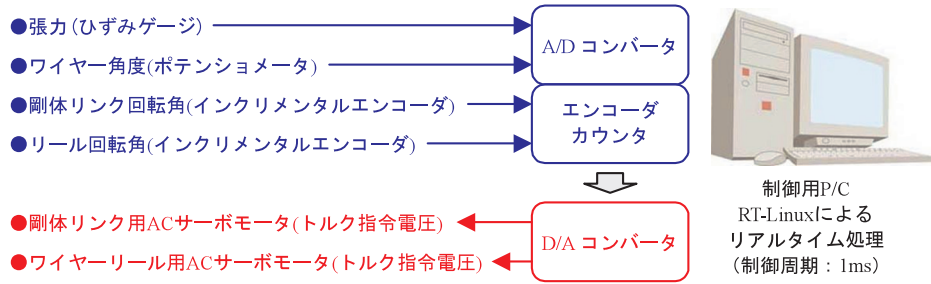


図10 制御システムの構成

表1 センサおよびアクチュエータの仕様

	ワイヤー角測定用ポテンショメータ	張力センサ(ひずみアンプ)	剛体リンク駆動用ACサーボモータ	ワイヤーリール駆動用ACサーボモータ	リールロック用ソレノイド
メーカー	日本電産コパル電子	共和電業	安川電機	安川電機	新電元メカトロニクス
型番	JT22-320-500	DPM-601A	SGMPH-04ABA61	SGMPH-02ABA61	3EC AW27 24V
主な仕様	電源電圧: 5V 出力電圧: 0.5~4.5V 回転角度: 320° 起動トルク: 0.147mN・m	ブリッジ電圧: 2V 出力電圧: ±5V 応答周波数: 2.5kHz	電源電圧: 200V 定格出力: 400W 定格トルク: 1.27Nm 定格回転数: 3000rpm 16bitインクリメンタルエンコーダ内蔵	電源電圧: 200V 定格出力: 200W 定格トルク: 0.637Nm 定格回転数: 3000rpm 16bitインクリメンタルエンコーダ内蔵	電源電圧: 24V 消費電力: 90W 吸引力(3mm): 35N 応答時間(3mm): 6ms

を設定することで、ワイヤーを強制的に送り出し、リールの巻き崩れを防止する。ローラーにはワンウェイクラッチを内蔵し、巻き取りの際にフリーで回転させることで、過剰に巻き込むことが無いよう考慮した。また、所望の投てきタイミング以前にリールが誤回転するのを防止するため、ソレノイドによりリールの回転を機械的にON-OFFする構造とした。

### 5. 投てき試験

試験装置による投てきの様子を図11に示す。投てき動作の準備段階で剛体アームを時計回りに回転して振り上げる(図

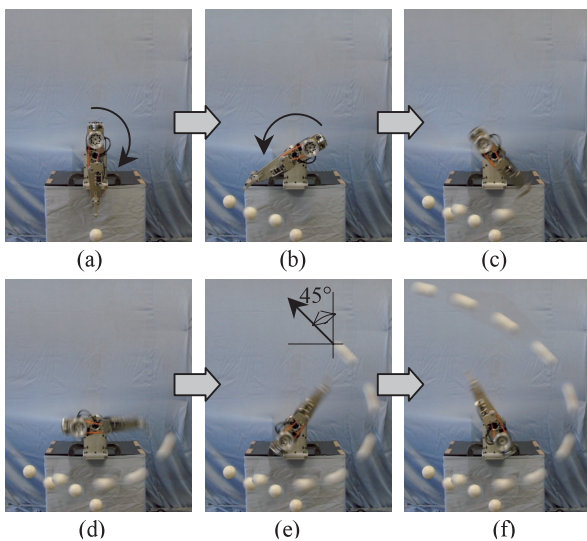


図11 投てきの様子

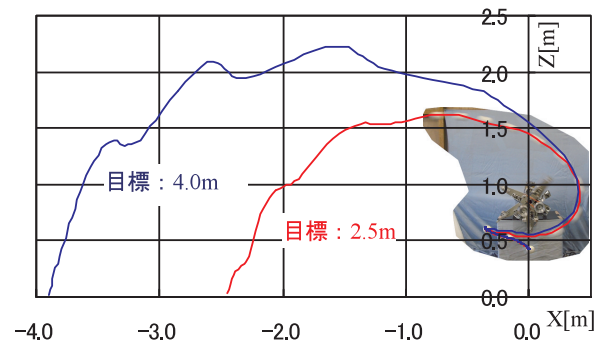


図12 測定された飛行経路

11-(a)~(b))。その後、反時計回りに回転し、ボールを加速する(図10-(b)~(e))。加速されたボールの速度ベクトルが垂直上方に対して45°を超えた時点でリールのロックを解除して飛行状態(図10-(e)~(f))へ移行すると同時に、所望の張力を発生するようリールのトルク制御を行う。投てき試験の結果、本試験装置を用いることで、機構解析で検討した振り子運動による投てき動作が可能であることが確認された。

図12に目標到達距離を2.5mおよび4.0mとしたときの飛行経路計測結果を示す。何れの場合も目標に対して精度良く到達しており、繰り返し計測した結果、およそ±2.5%の到達精度を有することが確認された。しかし、測定された経路を見ると、投てき動作から飛行の初期段階においてはビデオ撮影による実際の飛行経路と良く一致しているが、その後は振動的な経路となっている。飛行の途中で経路が上昇することは、現実的に起こり得ない現象であることから、計測系に問

題のあることが考えられる。現在、この原因を明確に特定出来てはいないが、次の2点が考えられる。

- (1) ワイヤーが弦のように振動することで、ワイヤー角測定用ポテンショメータが正確なボール方向を出力しない。
- (2) 投てきの瞬間反時計方向に重心回りの回転角速度（自転）を持つボールが、張力によるモーメントを受けたことで、時計方向に回転方向を変える。この繰返しによりワイヤー角の変動が発生した。

なお今回は投てき対象とワイヤーの動特性を考慮していない。実際には、投てき対象の慣性モーメント、ワイヤーの弾性、空気抵抗等が飛行に影響を及ぼす。特により遠方への投てきを想定した場合、その影響が顕著に現れるものと考えられる。そこで今後は、これらの動特性を含む厳密なモデルに基づいた飛行経路制御の検討が必要となる。

## 6. まとめ

作業範囲の拡大に有効と期待される投てき機構に関して、振り子運動による振り上げ動作を行うことで、効率的な投てき動作が可能であることを示した。また、投てき後の飛行制御に必要な計測を内界センサのみで行う方法について検討し、ワイヤーを介した張力により飛行経路を制御する方法を提案した。上記の検討結果に基づいた試験装置の設計と製作を行い、試験を行った結果、投てきについてはシミュレーションと同様の動作が可能であることを確認した。しかしながら、飛行経路の計測において正確な位置情報を得ることが出来ず、積極的な飛行経路の制御を行うには至っていない。

今回検討した投てき型作業システムは、既存のシステムと異なる概念で動作するものであり、現在は技術的な面で様々な検討がなされている段階にある。今後は得られた知見を踏まえ、機能の向上に向けた取り組みを進める予定である。

## 謝辞

本研究は、平成19年度(独)産業技術総合研究所「地域産業活性化支援事業」、ならびに平成20年度JST「シーズ発掘試験」により実施しました。

また本研究を進めるにあたり、(独)産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員の有隅仁氏より多大なご指導・ご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 有隅仁・神徳徹雄・小森谷清：キャスティングマニピュレーションに関する研究（第1報、可変長の紐状柔軟リンクを有するマニピュレータの提案とそのスイング制御法）、日本機械学会論文集C編，vol.64-626，pp.3854-38

61，（1998-10）

- 2) 有隅仁・神徳徹雄・横井一仁・小森谷清：キャスティングマニピュレーションに関する研究（第2報、スイング動作の制御実験とグリッパの投射動作）、日本機械学会論文集C編，vol.65-639，pp.4356-4363，（1999-11）
- 3) 有隅仁・小森谷清：キャスティングマニピュレーションに関する研究（第3報、撃力に対するひもの粘弾性解析とグリッパの空中軌道制御）、日本機械学会論文集C編，vol.68-665，pp.139-146，（2002-1）
- 4) 有隅仁・小森谷清：キャスティングマニピュレーションに関する研究（第4報、撃力を用いた飛行中のグリッパの姿勢制御）、日本機械学会論文集C編，vol.68-665，pp.147-155，（2002-1）