

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360122

研究課題名（和文）キャストイング作業システムを用いた器用な遠隔物体操作に関する研究

研究課題名（英文）Dexterous remote manipulation by the Casting manipulator system

## 研究代表者

有隅 仁（ARISUMI HITOSHI）

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：00356388

## 研究成果の概要（和文）：

ロボット本体から繰り出されるワイヤの先に装着されたグリップをアームの回転運動により目標物体へ投擲し、グリップによる物体把握、アームとリール機構による回収を行うシステムを提案し、各動作の生成法・機構を解明した。また、開発した実機を用いて、グリップの到達位置誤差を抑制した投擲、ワイヤ張力制御による物体把握、アームの揺動とワイヤ巻き取りの協調により物体を空中移動させる回収の各動作を実現した。

## 研究成果の概要（英文）：

We developed the casting manipulator system which consists of a rigid arm, a flexible wire with variable length, and a gripper. In this manipulation, the gripper is launched to the target with changing the length of the wire by rotating the arm. Then the gripper's trajectory is controlled by the tension of the wire, and it catches the target object. Finally, the target is retrieved by reeling up the wire with swinging the arm. We proposed the control methods for each motion phase and their effectiveness is verified through experiments.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	12,400,000	3,720,000	16,120,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：ロボット、マニピュレーション、投擲、ワイヤ駆動、姿勢制御、リリース機構

## 1. 研究開始当初の背景

測量や地質調査、大型建造物の保守・点検などの危険な作業は現在、熟練者によって行われているが、安全性・効率性・コストなどの観点からロボットによってこれらの作業を自動化することが望まれている。屋外作業用ロボットは、車輪や脚などの移動機構を含む移動マニピュレータが主流であるが、急斜面、深い窪み等の踏破能力が十分でなく、計測装置やサンプルなどの搬送が困難な場合がある。このため移動面の形状・性質に強く

影響されない物体搬送能力を備えたロボットの開発が課題となっている。そこで、我々はマニピュレーションによる到達領域の拡大に着目し、剛体アームと可変長のワイヤを有するロボットにより、ワイヤ先端に装着されたグリップを目標物体に投擲し、ワイヤ張力により飛行中のグリップの位置・姿勢を制御して物体を把握し、物体をロボット本体へ回収する、キャストイングによる物体操作法を用いてロボットの遠隔物体搬送能力の向上を目指す。

## 2. 研究の目的

キャスト作業を構成する以下の4項目の動作を実現するための運動生成法・制御法および機構を明らかにする。そして、以下の動作を行えるシステムを実際に構築し、投擲から物体把握を経由して回収するまでの動作に対するこれらの機構と制御系の有効性を明らかにする。

### (1) グリッパ投擲動作

グリッパを遠方の目標点へ精度良く投擲する方法を明らかにする。また、飛行中のグリッパの運動を制御するために、所望のワイヤ張力を発生させながら、ワイヤを高速に繰り出す方法を明らかにする。さらに、解明した投擲法ならびにワイヤ繰り出し法を実現する機構を開発し、提案する手法による投擲動作を実現する。

### (2) 物体把握動作

ワイヤの張力を制御し、グリッパの所望の飛行運動を生成する方法を明らかにする。また、物体安定把握のためのグリッパの適切な接近運動を検討し、グリッパの軌道を制御して目標接近運動を生成するための運動計画法を明らかにする。さらに、飛行中のグリッパの飛行運動に伴う張力を計測・制御する方法を検討し、グリッパ機構を用いて物体把握動作を実現する。

### (3) 物体回収動作

剛体アームの揺動によって瞬発的な力を発生させる方法ならびにワイヤの剛性を変えて効率よくグリッパに力を伝達させる方法を検討し、これらを組み合わせてグリッパを引っ張る方法を明らかにする。また、移動させる距離に応じて、剛体アームの揺動とワイヤ巻き取りの協調動作を繰り返すことによりグリッパを空中で移動させる方法を明らかにする。さらに、ワイヤの見かけ上の剛性を変える機構を開発する。最後に、実機により物体回収動作を実現する。

## 3. 研究の方法

### (1) 投擲動作

グリッパの投擲方式として系の回転運動を利用する方法を取り上げ、滑らかな加減速を可能にするカム曲線を用いて等速回転運動を生成する。また、放出機構の応答性を考慮して、グリッパの放出位置誤差を補正し、グリッパを安定に精度良く投擲する手法を検討する。投擲機構・放出機構を開発し、グリッパの到達位置精度を実験的に検証する。次に、グリッパ投擲後のワイヤ張力を大ダイナミックレンジで制御するワイヤ繰出し機構およびブレーキ機構について、種々の方法を比較・検討し、各機構の具体的な構造と制御法を明らかにする。

### (2) 物体把握動作

目標物体を安定に把握するには、グリッパ

は適切な位置・姿勢、速度で物体へ接近する必要がある。まず実際にグリッパを開発し、把握のための接近運動を調べる。次に、その接近運動を生成するためのワイヤ張力に関する制御変数を検討し、目標運動を生成するアルゴリズムを開発する。次に、滑り摩擦などの影響を除去し、安定な張力を発生させる方法を検討し、速度制御を可能とする張力制御機構を開発する。最後に、提案手法を用いて、実機により物体把握動作を実現する。

### (3) 物体回収動作

床を引きずりながら把握した物体を回収する場合、穴や段差等でスタックする可能性がある。これを回避するために、対象物体を空中で移動させて回収する方法を検討する。具体的には、ワイヤが緩んだ状態から剛体アームを振り上げ、駆動力と慣性力を利用して張ったワイヤを介してグリッパに瞬発力を与え、空中移動させながらワイヤを巻き取る方法を検討する。ロボット本体まで到達できる十分な運動エネルギーをグリッパに与えられない場合は、図1のように剛体アームの振りとワイヤ巻き取りを繰り返すエネルギーポンピングの原理を利用する。また、引き寄せたグリッパを動的に安定な周期運動に閉じこめる方法を検討する

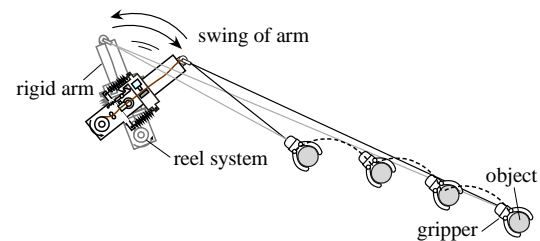


図1 剛体アームの振りとワイヤ巻き取りの協調動作の繰り返しによるグリッパの空中移動

## 4. 研究成果

### (1) 投擲動作

#### ① 投擲機能

グリッパの放出タイミングのズレを考慮し、これらの影響を抑えて精度よく目標点へグリッパが到達するための投擲法を述べる。

図2に示すモデルにおいてグリッパを質点と仮定すると、グリッパを目標点へ到達させるための目標放出角度・角速度の関係は次式で表せる。

$$\omega_{li} = \sqrt{\frac{g\alpha^2}{2L_1^2 \cos^2 \theta_{li} \beta}} \quad (1)$$

ただし、放出角度を  $\theta_{li}$ 、放出角速度を  $\omega_{li}$ 、目標位置を  $(x_d, y_d)$ 、アームの回転中心を  $(x_A, y_A)$  とし、 $L_2 = 0$ 、 $\alpha = -x_A + x_d - L_1 \sin \theta_{li}$ 、 $\beta = y_A - y_d - L_1 \cos \theta_{li} + \alpha \tan \theta_{li}$  とする。上式の関係を模式図で表すと図3に示す凸曲線になる。ここで、回転速度  $\omega_{li}$  の等速回転運動から投擲する場合、目標点へ到達させる放出点は点Pと

なるが、放出角度に誤差が生ずる場合、同図の緑色線分のように曲線から大きく外れることになるため、グリッパの到達位置に関して目標点からの誤差が大きくなる。そこで、放出点を曲線の変化率が小さい変曲点 Q にすることにより、到達位置誤差を抑制することを提案した。

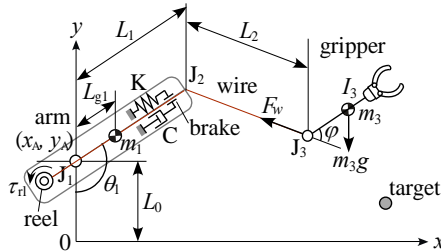


図2 キャスティング作業システムのモデル

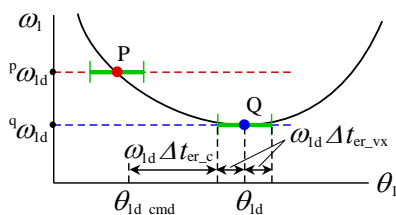


図3 目標点到達曲線と放出角度誤差

次に、グリッパ放出機構の放出時刻 $\Delta t_{er}$ のズレを調べた。図4に示す基礎実験では、放出機構に装着したグリッパ重心の真下にレーザレンジセンサ(キーエンス社製 LK-500)を設置し、制御装置から放出指令を送った後、自由落下するグリッパの高さを測定する。この試行を5回繰り返した結果を図5に示す。なお、センサの繰り返し精度は $10\mu m$ で、サンプル周期を $1ms$ に設定した。この結果から放出時刻の一定誤差時間 $\Delta t_{er,c} = 0.013s$ 、ばらつき時間 $\Delta t_{er,vx} = 0.006s$ を得た。これらの誤差を考慮して放出指令角度を補正してグリッパを投擲したときの到達位置誤差を図6

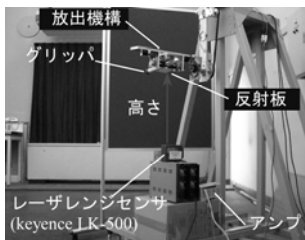


図4 放出機構の応答性を調べるための落下実験

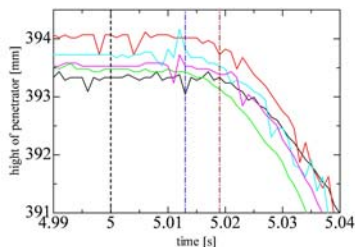


図5 放出機構の応答時間

に示す。なお、目標点位置を(5m,0)、目標放出角度・角速度を $40.24deg$ 、 $663.87deg/s$ とした。同図に示すように誤差は $-0.15m \sim 0.16m$ の範囲に含まれるため、投擲距離5mに対して誤差範囲を $0.31m$ (6.2%)に抑えることを可能とした

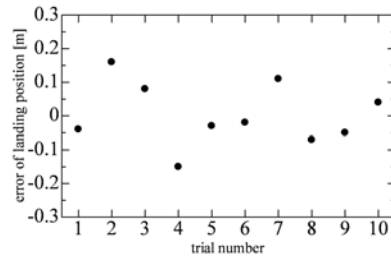


図6 グリッパの到達位置誤差

## ②ワイヤ繰り出し機能

ここでは、ワイヤ張力を微小な大きさから瞬間的で非常に大きな大きさまで、すなわち大ダイナミックレンジで制御するワイヤ繰り出し機構を提案し、開発した機構を用いてそのワイヤ張力制御特性を解析的・実験的に把握した。まず、釣り用スピニングリールのようにスプールを固定し、その周りを回転するロータの回転を拘束することでワイヤ張力を制御する方式を基本とし、ロータの有効半径(ロータの回転中心からワイヤの接触する位置までの距離)を変更する張力制御機構を提案した。この距離を変化させて大きなレンジでの張力制御を可能とするために、図7に示す提案機構は、スプールとロータ、ロータの回転を制動するブレーキ、固定されたディスクとドラム、直動アクチュエータにより位置の変更が可能なリングから構成される。

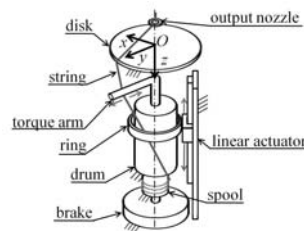


図7 提案した2入力のブレーキ機構

次に、ロータの有効半径、ブレーキの制動トルクと、ワイヤ張力の関係を把握するために静力学解析を行った。提案機構の静力学モデルと機構変数を図8に示す。座標原点はディスク中心とし、ディスク上を $x-y$ 平面とする。ドラム方向を $z$ 軸正方向とし、ディスクとワイヤの接触点を $x=0$ とした。またディスク、ロータ、リングとワイヤの接触点をそれぞれ点D、B、Rとする。ここでは各点でのワイヤとの摩擦は無視する。ディスクの半径、原点からワイヤとロータの接触位置までの長さ、リングの半径をそれぞれ $r_D$ 、 $r_B$ 、 $r_R$ 、ディスクからロータまでの距離を $l_B$ 、ディス

クからリングまでの距離を  $l_R$ 、リングとワイヤの接触点 R を  $x$ - $y$  平面上で見たときの直線 RO と  $x$  軸の間の角度を  $\theta_R$ 、ワイヤ張力を  $F$  とするとき、ワイヤ張力  $F$  とブレーキによる制動トルク  $\tau$  および  $l_R$  の関係は次式で求められる。

$$F = \tau \frac{\sqrt{(r_R \cos \theta_R)^2 + (r_R \sin \theta_R - r_B)^2 + (l_R - l_B)^2}}{r_B r_R \cos \theta_R} \quad (2)$$

上式の関係式にさらにディスクとワイヤの間の摩擦力  $F_D$  とワイヤ出口穴でのワイヤとの摩擦  $F_S$  を考慮すれば、グリップに作用する張力  $F_G$  は  $F_G = F + F_D + F_S$  となる。

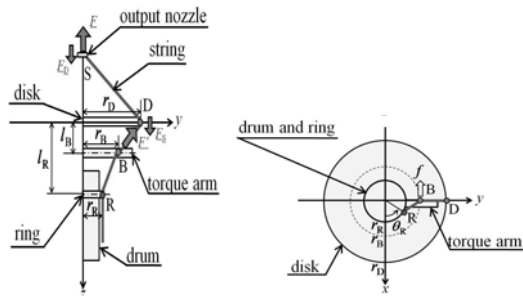


図8 ブレーキ機構の力学解析モデル

提案機構の特性を把握するために、図9に示す実験装置を製作した。諸元は  $r_D = 200\text{mm}$ 、 $r_R = 28\text{mm}$ 、ドラム径:110mm、ロータ長:90mm である。ブレーキには電圧により制動トルクが制御できるヒステリシスブレーキを採用し、リングの位置は瞬間的に大きな力を繰り返し発生できるようにスライダクランク機構を用いて制御した。なお、スライダのストロークは 100mm である。張力センサはワイヤ繰り出し機構の本体繰り出し口の上に取り付けた。また、グリップの運動を模擬するためにプーリーを DD モータに取り付けてワイヤを巻き取った。なお、ブレーキにはオグクラッチ HB-10DD を DD モータには安川電機 SGMCS-07B3C41 を用いた。

実験結果の一例を図10に示す。図10(a)は  $l_R$  を一定値 0.125m とした場合のブレーキのトルク  $\tau$  とワイヤ張力  $F$  の関係、図10(b)はブレーキのトルク  $\tau$  を一定値 0.194Nm とした場合の  $l_R$  とワイヤ張力  $F$  の関係を示している。これらの結果より、2つの制御パラメータを有する提案ブレーキにより、ワイヤ張力のより広い範囲での制御が可能であることが検証された。

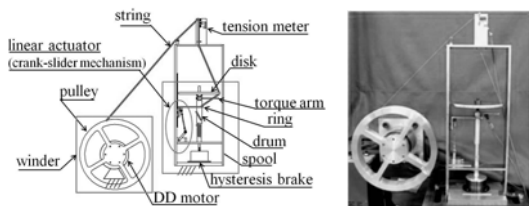


図9 実験装置の構成と写真

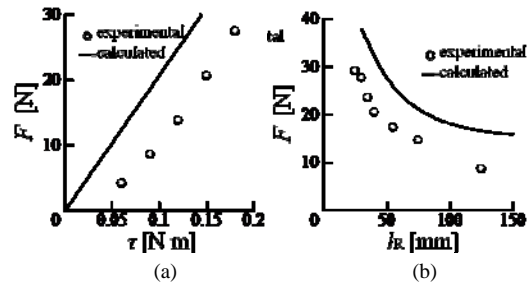


図10 実験結果

## (2) 物体把握動作

### ① 張力制御機構

滑らかなエンドエフェクタの軌道を生成するために図11(a)に示す張力制御機構を提案した。この機構では、ブレーキは ON/OFF 動作のみを行うこととし、グリップに作用する張力をばねの伸びを直動アクチュエータにより制御する。この張力制御機構の特性を把握するために試作した実験装置を同図(b)に示す。さらにワイヤ巻取り機構には、直径 300mm のプーリーと定格回転数が 200rpm の DD モータを用いた。

この張力制御機構の張力制御モデルを作成してパラメータ同定を行った上で、実際に図12(a)に示す2通りの張力軌道を与え、エンドエフェクタを鉛直下向きに落下させる際の速度制御を試みた結果を図12(b)に示す。この結果より、張力が滑らかに制御可能であり、張力の与え方を変えることにより、エンドエフェクタの滑らかな速度制御が可能であることが確認された。

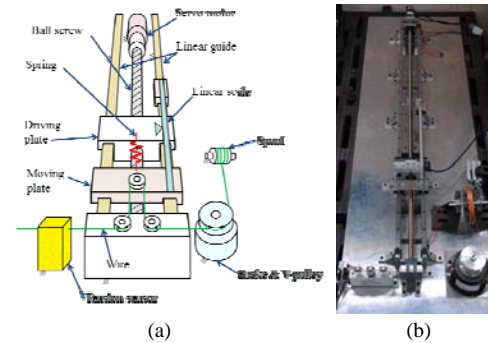


図11 実験装置

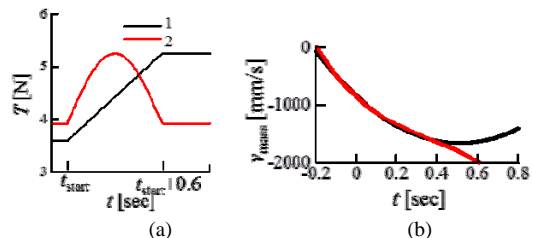


図12 実験で与えた張力軌道と制御結果

### ② 目標接近運動の生成

張力制御機構を剛体アーム上に設置する場合を考える。ワイヤをブレーキする時刻  $t_b$  と

その継続時間 $\Delta t_b$ によりバネの伸縮がおき、グリッパの飛行運動を制御することが可能となる。そこで、飛行中に複数回のブレーキを行うことを想定して、グリッパの軌道制御のための制御パラメータを  $\mathbf{u}_c (t_{b1}, \Delta t_{b1}, t_{b2}, \Delta t_{b2}, \dots, t_{bn}, \Delta t_{bn})$  とおく。このとき、グリッパの放出時の状態を  $\mathbf{S}_0$ 、ブレーキ制御を行った後の最終状態を  $\mathbf{S}_f$  とすると、 $\mathbf{S}_f$  は  $\mathbf{S}_0$  と  $\mathbf{u}_c$  によって求まる。そこで、グリッパが目標物体に接近するときの目標状態を  $\mathbf{S}_d (x_d, y_d, \varphi_d, v_{xd}, v_{yd}, \omega_d)$  とし、 $\mathbf{S}_f$  と  $\mathbf{S}_d$  との距離を表す評価関数  $D$  を次式のように表す。

$$D(\mathbf{S}_d, \mathbf{S}_f) = |\mathbf{w}(\mathbf{S}_d - \mathbf{S}_f)| \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{w}$  は重み関数である。最適化法を用いて  $D$  を最小にする  $\mathbf{u}_c$  を求めることにより、把握のためのグリッパの目標接近状態を生成することが可能となる。なお、理想的な目標接近状態として、グリッパの回転速度を零近傍にし、かつパームが目標物体の方向を向くようにする。本手法に対して目標物体位置 (1.3m, 0)、グリッパ重心に関する目標状態  $\mathbf{S}_d$  (1.36m, 0.098m, 1.05rad, -1.5m/s, -2.6m/s, 0) を与え、得られた制御変数  $\mathbf{u}_c$  を用いて把握動作実験を行った。図 13 に示すように、グリッパの姿勢を変えながら適切な姿勢で目標物体に接近し、物体を把握する動作を実現した。

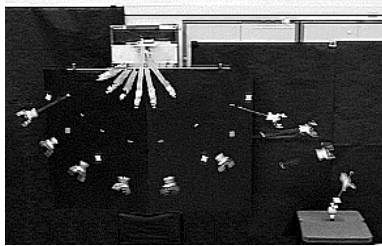


図 13 物体把握実験の様子

### (3) 物体回収動作

まず、ワイヤ引っ張り時のダンピングによるエネルギー損失を抑制するために図 14(a)で示すようなワイヤにバネ特性を付加する機構を提案した。これは、アーム上を往復するスライダ、スライダ上に装着されたワイヤ拘束用のブレーキ、スライダとアーム本体を繋ぐバネ、スライダを止めるフック、フックのロック機能を解除する装置で構成される。この SSB 機構の特長は、スライダ上のブレーキを ON/OFF することによりワイヤの見かけ上のバネ効果を付加・除去できること、バネ効果を与えときの慣性負荷が小さいことなどである。図 14(b) に示す開発した SSB 機構は同図(c)のアーム上に搭載されている。

次に、SSB 機構を用いた回収動作の生成法を述べる。アームのスイングの目標軌道にカム曲線を用いると、1 回のスイングの制御変数は最大スイング角度と動作継続時間であ

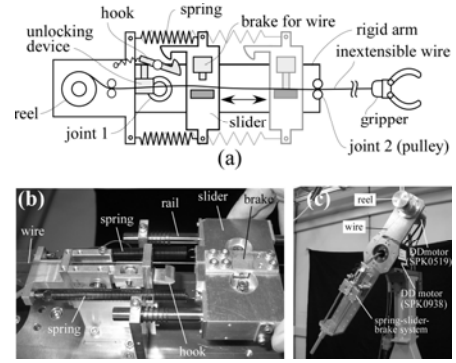


図 14 スプリング・スライダ・ブレーキ(SSB)機構

る。図 15 に示す(a)~(d)のアームの位置を、それぞれアーム駆動開始位置、引っ張り開始位置、引っ張り終了位置、振り子運動位置とし、各位置でのアーム角度を  $\theta_{1a}, \theta_{1b}, \theta_{1c}, \theta_{1d}$ 、時刻を  $0, t_b, t_c, t_d$  とする。同図のようにアームを振り上げてワイヤを引き、アームを戻してワイヤを巻き取る場合、制御変数は  $\mathbf{U}_c(t_c - t_a, t_d - t_c, \theta_{1a}, \theta_{1b}, \theta_{1c}, \theta_{1d})$  で表される。一方、グリッパの放物線軌道を振り子軌道に滑らかに遷移させるためには、両軌道を結ぶ連結点において、放物線軌道の速度方向と振り子軌道の接線方向が一致する必要がある。振り子軌道の接線方向は、振り子の中心の座標と連結点の座標により求められるので、物体速度方向の傾きを  $\alpha_d$ 、連結点を  $P_d(x_d, y_d)$ 、その点の速度を  $\mathbf{v}_d (v_{xd}, v_{yd})$  とすると、連結点において次式の制約条件が与えられる。

$$\alpha_d = \frac{v_{yd}}{v_{xd}} = \frac{x_d}{(L_0 - L_1 - y_d)} \quad (4)$$

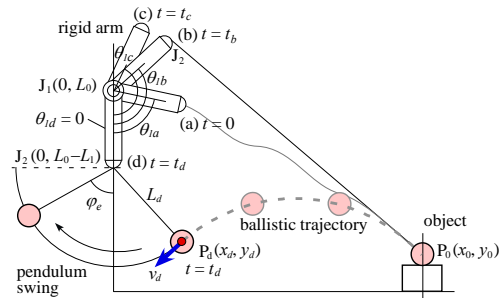


図 15 回収時の物体とアームの運動

適当な制御変数  $\mathbf{U}_c$  を与えると、剛体アームによる引っ張り動作が決まるので物体の放物線軌道は数値演算的に求まる。放物線軌道が求まると、その  $x$  座標が  $x_d$  になったときの最終状態  $\mathbf{S}_f$  も求まる。一方、 $P_d$  における目標状態  $\mathbf{S}_d (x_d, y_d, \alpha_d)$  を与えると、最終状態  $\mathbf{S}_f$  と  $\mathbf{S}_d$  との距離  $D$  は式(3)で表わされる。したがって、制約条件式(4)を満たし、かつ  $D$  を最小にする  $\mathbf{U}_c$  を最適化法により求めることにより、物体の放物線軌道を振り子軌道に滑らかに遷移させる回収動作を生成できる。

グリッパの初期位置( $x_0, y_0$ )を(2.0m, 0.32m)、目標状態  $S_d(x_d, y_d, \alpha_d)$ を(0.5m, 0.4m, 0.6173)と与えると、上述の手法により  $U_C = (0.560s, 0.337s, 56.0deg, 107.0deg, 138.0deg, 0)$ を得る。この制御変数を用いて回収動作制御を行った結果を図 16 に示す。図 16(e)を除いた実験結果はシミュレーション結果によく一致した。図 16(e)では、物体が目標点  $P_d$  へ到達したときに剛体アームが図 15(d)に示す目標姿勢へ到達していない。この遅れにより物体は振り子運動時にワイヤ方向に微小に振動する現象が確認された。これは、弾道軌道と振り子軌道との連結点位置にズレが生じたことが原因と考えられる。剛体アームを駆動する DD モータの応答遅れを考慮した制御を行えば、この問題を解決すると期待できる。この微小振動を除けば、放物線軌道から振り子運動へほぼ遷移しており、提案手法による物体回収動作が実現された。

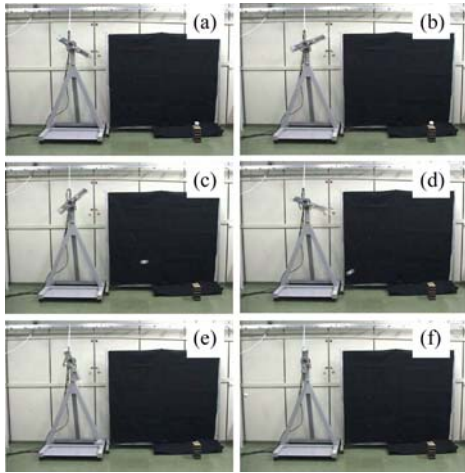


図 16 物体回収動作

今後は、キャスティング作業システムを用いて、回収した物体をさらに他の場所へ配置する方法を検討していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ①有隅仁、横井一仁、Collecting an Object by Casting Manipulation、Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS10)、査読有り、Vol. 1、2010、55-62、<http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=Collecting+an+Object+by+Casting+Manipulation&x=35&y=18>
- ②塩見飛鳥、樋口勝、武田行生、有隅仁、Development of a Reel-out Mechanism with Large Dynamic Range Tension Control Characteristics for Casting Manipulator、Proceeding of First IFToMM Asian Conference on Mechanism and Machine

Science、査読有り、2010、なし

[学会発表] (計 4 件)

- ①有隅仁、武田行生、中坊嘉宏、キャスティング作業システムによる高所物体の回収動作、第 29 回日本ロボット学会学術講演会、2011 年 9 月 7 日、東京・芝浦
- ②有隅仁、武田行生、横井一仁、キャスティングマニピュレーションによる物体回収動作の生成、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010、2010 年 6 月 16 日、北海道・旭川市
- ③塩見飛鳥、樋口勝、有隅仁、武田行生、キャスティングマニピュレータの大ダイナミックレンジ張力制御特性を有するワイヤ繰り出し機構の開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010、2010 年 6 月 16 日、北海道・旭川市
- ④有隅仁、横井一仁、キャスティングマニピュレーションによる物体回収動作、第 15 回ロボティクスシンポジウム、査読有り、2010 年 3 月 15 日、奈良県・吉野郡

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

有隅 仁 (ARISUMI HITOSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：00356388

### (2) 研究分担者

武田 行生 (TAKEDA YUKIO)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：20216914

中坊 嘉宏 (NAKABO YOSHIHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：70360609

### (3) 連携研究者

横井 一仁 (YOKOI KAZUHITO)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・副研究部門長

研究者番号：40358304

### (4) 研究協力者

樋口 勝 (HIGUCHI MASARU)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：40293039

松浦 大輔 (MATSUURA DAISUKE)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：40618740

塩見 飛鳥 (SHIOMI ASUKA)

東京工業大学・理工学研究科・修士学生

研究者番号：なし