

# 1. 緒言

---

2010年頃のマニピュレーションシステムは、人間の負担の大きい操作と高精度のアームやハンドを必要としていましたが、2歳の子供の操作能力には及びませんでした。そこで米国国防総省高等研究計画局（DARPA）は、ARM（Autonomous Robotic Manipulation）プログラムへの出資を開始しました。このプログラムは、ロボットのハードウェアを低コスト化して普及させるとともに、自らサブタスクを実行するマニピュレーターのインテリジェントな制御を実現することを目的としています。

ARMプログラムは、ソフトウェア、ローコストハンド、ローコストアーム、アウトリーチの4つのトラックで構成されています。ARM-Sは、ソフトウェアトラックで、知覚のためのローカルセンサを使用した新しい把持および操作技術の開発を行っています。ローコストハンドトラックのARM-Hでは、低コストで器用な多指ロボットハンドの設計・開発を行っています。低コストアームトラックは、低コストでロボットと補装具の両方の用途に使用することを目的としています。アウトリーチ・トラックでは、一般の人々にARM技術を体験してもらう機会を提供しています。この論文では、ARM-SとARM-Hの両方における最近の研究について説明する。

## 2. ARM-S トラック

---

自律型システムの開発・テストには、従来から多くの課題がありました。研究者は、十分な性能を持つハードウェアを持たないことが多く、その維持にも苦労します。また、異なるプラットフォームや異なるテストセットで実行されたアルゴリズムの結果を比較したり、ベンチマークを取ることも困難です。アルゴリズムの評価は、長い開発期間の最後に行われる大規模で複雑なイベントであることが多い。

このプロセスでは、プログラム全体での反復的な改善や進捗状況の評価ができません。DARPAはARMプログラムにおいて、これらの制限に直接取り組んできました。チームには、同一のロボットハードウェア、定期的なテスト構造、さまざまなテスト課題が提供される。

ARM-Sトラックは、17ヶ月と21ヶ月の2つのフェーズで構成されています。ARM-Sトラックは、17ヶ月と21ヶ月の2フェーズで構成されており、専門知識と斬新なアプローチを持つ6つのチームに資金が提供されました。カーネギーメロン大学、HRLラボラトリーズ、アイロボット、NASAジェット推進研究所、SRIインターナショナル、南カリフォルニア大学の6チームです。フェーズ1は2011年11月に完了し、フェーズ2は2013年まで進行中です。

**Robot:** これまでのDARPAのロボットプログラムでは、研究チームがロボットの構築とメンテナンスを行い、ロボットを動かすための低レベルのOSコードを記述し、さらに研究目的を達成するための自律的なソフトウェアを開発していました。この方法では、研究活動が希薄になり、テスト結果の比較が非常に難しくなります。そこでDARPAは、ペンシルバニア州ピッツバーグのre[1]社にプログラム用のロボットの製作を依頼し、ARM-Sの全チームにロボットを提供した。

---



Fig. 1 カバーを外した状態のARMロボット

ARMロボット（図1）は、最先端のハンド、アーム、および知覚センサーを統合したものである[2]。このロボットは、2台のデスクトップ・ワークステーションによって制御されます。1台のワークステーションは、リアルタイム・オペレーティング・システムとCANバス接続を用いて、アームとハンドを制御する。もう1台は、センシング、プランニング、ユーザーインターフェイスなどのソフトウェアを搭載している。

フェーズ1では1本の腕と1本の手が用意されていましたが、フェーズ2では2本の腕と手を使って両手作業を行います。開発者は、必要なソフトウェア環境やライブラリ、ツールを自由に使うことができます。多くのチームはROSをベースにして、独自のカスタムソフトウェアを追加しています。

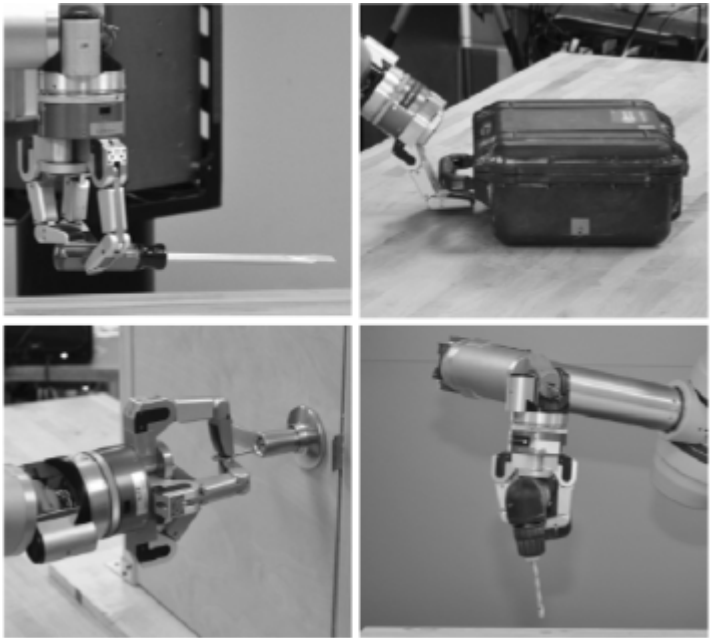
**評価:** このプログラムで重要なのは、定期的に行われる独立したテストです。パフォーマーチームは、自分たちの拠点でARMロボットを使ってソフトウェアを開発し、テストを行います。およそ6週間の間隔で、チームはソフトウェアをDARPAのテストサイトにアップロードし、テストチームはロボットの別のコピーを使って、一連の独立したスパイラルテストを行います。これらの中間試験は練習のためのものですが、各フェーズの終わりには、最終的な正式評価が行われます。

各中間テストにおいて、チームはテストサイトとのマルチメディア電話会議を行い、ロボットの動作やソフトウェアの診断を確認しながら、テストチームと結果を議論しました。その結果、両チームともに自律走行の様子をより深く理解することができました。

このようなテストには、いくつかの重要な利点があります。チームとDARPAの双方が、研究の進捗状況について定期的なフィードバックを受けることができます。テストの難易度を変更することで、ロボットの性能を追求したり、チームのパフォーマンスを向上させることができます。最後に、このテストでは現実の問題に焦点を当てることができます。

ARM-Sの各テストは、一連の把持または操作の課題で構成されています。把持課題では、ロボットの前のテーブルに5種類のポーズで物体が置かれ、人間が把持すべき物体の種類を指示すると、ロボットはその物体を認識して位置を確認し、手に取るという課題が与えられた。

そして、しっかりと掴んだことを確認するために、ロボットはテーブル上の指定された場所に対象物を置きました。操作の課題は、「ドアを開ける」などの高度な指示が与えられるだけで、同様に行われました。成功とは、タスクが完了したことであり、各試行は時間が計測されました。タスクの例を図2に示します。



フェーズ1の課題は、上の写真と下の写真です。

握るものは、ボール、シャベル、懐中電灯、電球、ラジオ、ハンマー、ロックドライバー、ケースなど。操作の課題は、ホッチキスの作動、懐中電灯の点灯、電話の掛け方、ドアの開け方、ドアの解錠、穴の開け方。

知覚は必要な要素ではありますが、プログラムの焦点ではないため、チームには事前に各物体の3Dモデルが渡されました。さらに、特定のスキャンファイルを持たないハンマー、石、ドライバーを使った実験も行われた。見たことのない物体は、スキャンされた物体と大まかな形は同じだが、チームが練習したものとは異なる寸法であった。

ARM-Sの評価基準は、タスク完了の成功（バイナリー）を第一とした。スコアと統計の計算には、5回の実行のうち、ベスト4回の実行を用いた。同点の場合、二次的な評価基準は試行の平均時間とした。

**Phase 1 Results:**2011年11月、ARM-Sフェーズ1の終了時に最終評価を行いました。表1は、6チームの結果をまとめたものです。

Tab. 1: ARM-Sテスト結果-成功例

Team	Successes ( $\leq 72$ )	Grasping ( $\leq 48$ )	Manipulation ( $\leq 24$ )	Avg. Time (s)
A	67	47	20	75.4
B	67	47	20	80.6
C	64	46	18	77.5
D	58	47	11	125.7
E	58	41	17	170.7
F	49	42	7	151.8

6チームのうち、上位3チーム（A、B、C）が選ばれ、フェーズ2に進みました。フェーズ2では、2本の腕と手を使って、現実世界の延長線上にある一連のシナリオを実行することに焦点を当てる。図1は、そのうちの1つである「タイヤ交換」の様子を示したものです。

### 3. ARM-H トラック

---

ARM-Sの技術がどれほど優れたものであっても、15万ドルのマニピュレーターを使用しなければならないのであれば、軍事・商業用途に移行することは非常に困難です。そこで、ARMハードウェアトラックの目標は、頑丈で器用な多指ハンドを、既存の設計よりも桁違いに低コストで設計・製造することでした。これにより、現在使われている爪型のマニピュレーターを、3～4本の指と手のひらを持つハンドに置き換えることが可能になります。

2年間のプログラムに参加したのは、iRobot、Sandia National Laboratories、SRI Internationalの3チームでした。この3チームは、2011年に実施された重要設計審査を無事通過し、2012年6月の本審査に進みました。完成した3つのハンドをFig.3に示します。

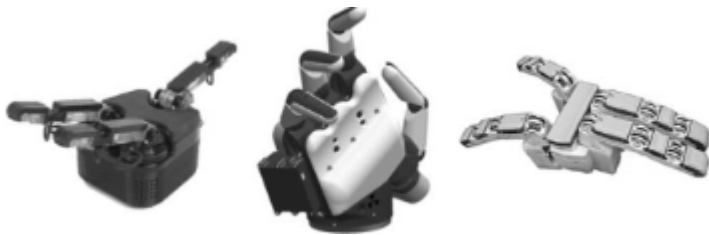


Fig. 3: ARM-H社のハンズアイロボット（左）、サンディア社（中段）、SRI社（右）。

**評価:** 新開発のハンドによるマニピュレーションタスクの能力を検証するため、DARPAのテストサイトで正式な評価が行われた。各チームは、ARM-Sと非常によく似た把持と操作の課題を行いました。具体的には、水筒、投光器、ドリルなどの物体を拾い、懐中電灯に電池を入れたり、バルブを回したりといった操作を行った。また、手の力を測るために、6.8kgのダンベルを拾うことにも挑戦した（このテストでは、手で物体を握り、手首を手動で持ち上げた）。

今回の実験では、ハンドは機械的にARMロボットに取り付けられていましたが、電気的にはチームのコントローラーに接続されていました。ARMロボットの腕には、バレット社の7-AXISジンバル／マスターアームシステムが接続されており、チームメンバーの1人がロボットの腕を遠隔操作できるようになっていました。もう一人は手の動きをコントロールしていた。そのため、実験では、現場を直接見ている2人のオペレーターが連携して作業を行いました。図4は、ARM-Hの試験構成を示したものです。



Fig. 4: ARM-Hのテストが進行中

評価は、ARM-Sと非常によく似たプロトコルで行われました。対象物を異なるポーズで提示し、5回のタイムトライアルを行いました。評価指標は、タスクの完了を第一に、タスクの平均時間を第二に設定しました。5回の試行のうち、上位4回を統計に用いた。

ARM-Sと同様に、それぞれのチャレンジタスクは異なるポーズで5回行われました。評価基準は、タスクの成功率が第一。同点の場合は、所要時間を第二の基準とした。5回のうちのベスト4をスコアと統計に使用しました。

Tab. 2: ARM-Hテスト結果-成功例

Team	Grasping ( $\leq 48$ )	Manipulation ( $\leq 24$ )	Strength ( $\leq 2$ )	Total ( $\leq 74$ )
X	56	13	2	71
Y	56	16	2	74
Z	52	16	2	74

**結果:** 表2にチーム別の成功例を，図5にオブジェクト別の平均タスク時間を示す．トップチーム（X）は、現在進行中のARM-Sトラックで複数のハンドを製造するための資金を得ており、実世界のシナリオで幅広く使用される予定です。

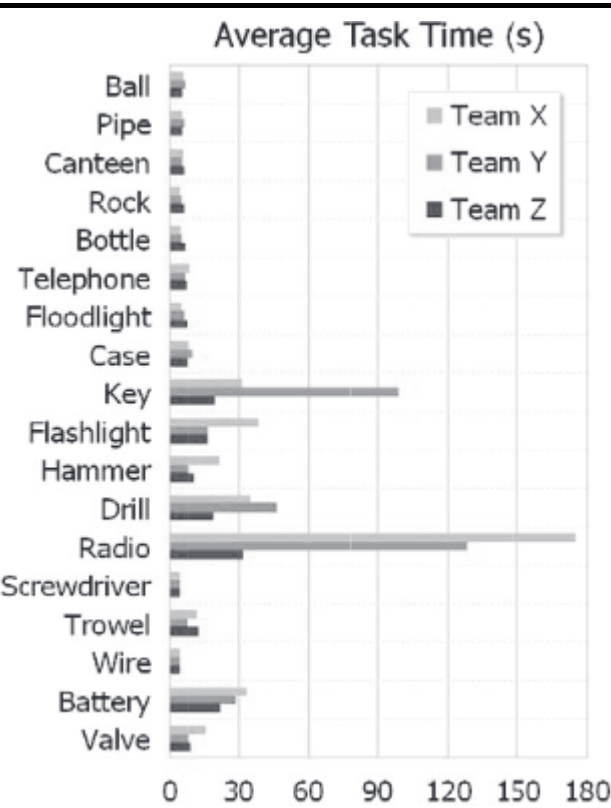


Fig. 5: ARM-Hテスト結果-ランタイム

## 4. 結論と今後の課題

これまでのところ、ARMのパフォーマーチームは期待以上の成果を上げており、3つの優れたロボットハンドを製作し、ロバストなソフトウェア性能においても重要な進歩を遂げています。私たちは、この取り組み

がロボット操作の技術を向上させたと信じており、残りのプログラムでさらなる成功を収めることを期待しています。