

U.D.C 69.059.63+519.687

実際の解体現場から発生した建設廃棄物に対する 選別ロボットハンドの性能検証

井上 大輔* 中村 聡*

要約： 筆者らは解体作業の効率化、作業環境向上、リサイクル率向上を目的として、建物の解体現場で発生するコンクリート塊、木くず、金属くず、廃プラスチック、等から構成される建設副産物を中間処理施設に移送する前に解体現場で自動選別する選別ロボットの開発を行っている。本稿ではその要素技術のひとつとして、多品種不定形の建設副産物を粉砕せずに選別する押し・掴み兼用ロボットハンドの構成と、3つの動作モードについて述べる。2本のツメを使った把持動作と、バンパによる押し動作を組み合わせることで、コンベア上に展開された建設副産物のうち主要5品目を平均90%以上回収できることを、実現場の建設副産物を用いた実験によって確認する。

キーワード： 建設系産業廃棄物、産業用ロボット、エンドエフェクタ、グラスプレスマニピュレーション、経路計画

- 目次：**
- | | |
|---------------------|-------------------|
| 1. はじめに | 4. ロボットハンドの性能評価実験 |
| 2. ロボットハンドの4つの特徴 | 5. まとめ |
| 3. ロボットハンドの3つの動作モード | |

1. はじめに

建物の解体現場で発生する建設副産物は、主にコンクリート塊、木くず、鉄筋やアルミサッシなどの金属くず、廃プラスチック、等から構成される。これらを再利用するために、現場や中間処理施設では可能な限り人手や機械による分別が行われている。しかし課題として、多くの時間と労力を要することや、粉塵の飛散等に伴う作業環境の悪化がある。

筆者らは解体作業の効率化、作業環境向上、リサイクル率向上を目的として、建設副産物を中間処理施設に移送する前に解体現場で自動選別するロボットシステム（以下、選別システム）の開発を行っている¹⁾。本稿ではその要素技術のひとつとして、多品種不定形の建設副産物を選別する3指ロボットハンドの構成と、3つの動作モードを提案する。

2. ロボットハンドの4つの特徴

建設廃棄物は不定形かつ多品種であり、かつコンクリート塊や鉄筋くずのような重量物を大量に含む。このため、掴んで持ち上げることを前提とした汎用のロボットハンドでは取り扱いが難しい。これらをベルトコンベア上に展開し、品目ごとに自動選別するために、図1と表1に示す押し・掴み兼用のハンドを開発した。本ハンドは次の4つの特徴的な機構を有する。

2.1 板状のバンパ

外力に応じて受動的に回転する板状の部品からなる機構である。対象物を押し動かしたり、ツメとの間に挟んだりするために用いる。バンパが外力に応じて傾くことによって、動作制御なしに対象物との接触時の衝撃を緩和し、対象物の跳ね返りを減らすことで捕

捉・回収の成功率を高めることができる。またロボットアームのモータへの負荷を軽減する機械的な安全装置としても作用し、対象物が重すぎる場合は、バンパの傾きが大きくなったことを検知してロボットの動作をキャンセルできる。バンパの傾きに対するコンプライアンスは、エアシリンダへの供給圧力で調整できるようにした。

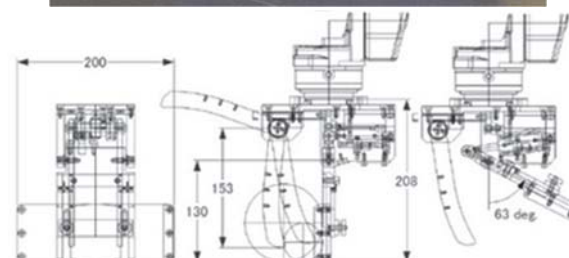
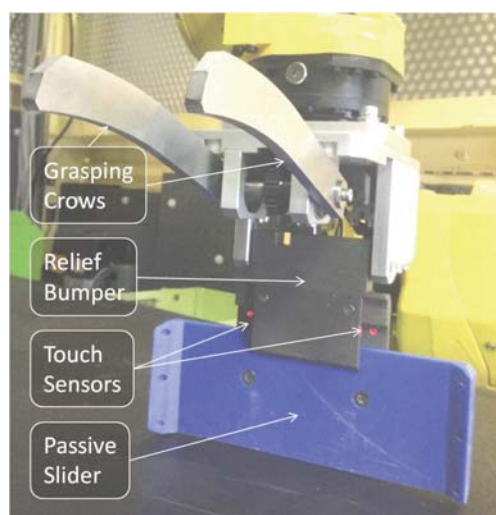


図1 開発した建設副産物選別ハンドの構成

*技術研究所 メカトロG

表1 ロボットハンドの仕様

サイズ mm	高さ 208×幅 200×長さ 170
質量 kg	2.3 (端子台を除く)
アクチュエータ	複動エアシリンダ φ16×2 最大供給圧力： 1.0 MPa
センサ	シリンダスイッチ ×3 反射型赤外線センサ ×2 電源： 直流 24 V
ツメ	長さ 153×幅 10×肉厚 5 [mm]
スライダ	幅： 100 ~ 200 [mm] スライド長： 22 mm
バンパ	最大トルク： 3.2 N・m 最大発生力： 25 N (スライダ先端) バンパ回転軸からスライダ先端 までの長さ： 108 ~ 130 [mm] 最大逃げ角： 63 deg.

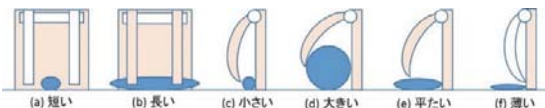


図2 不定形廃棄物の捕捉方法

(青：対象物，赤：捕捉に使用する部分)

2.2 2本の回転ツメ

回転関節を有しスライダに接触可能な2本の円弧状の部品からなる機構である。バンパと併用することで、図2のように多様な形状の対象物を捕捉することが可能である。bやcのように対象物をバンパとの間に挟んで、重機に用いられるフォークグラブのように把持(Grasping)することも可能である。ツメによる把持が難しい物に対しても、dやeのようにツメでコンベアに抑えつける動作(保持: Holding)や、aやfのようにバンパのみを使った押し動作(掃引: Pushing)が可能である。ツメの駆動系にはエアシリンダとラックピニオンを採用した。

2.3 受動スライダ

バンパの先端長さを受動的に調整するためにバンパの先端に取り付けられた、樹脂性の部品からなる機構である。これによって、押し動作における以下の2つの課題を解決する。1つめは、対象物設置面の不陸に沿って押す経路の制御が必要であり、制御方法が複雑となることである。なぜなら、対象物の転がりや噛みこみを防ぐためにはできるだけ低い位置から押すことが望ましい。2つめは、捕捉装置と設置面との間に摩擦力が生じるためにロボットアームへの負荷が大きくなることである。該スライダが環境との接触に応じて受動的に動くことによって、力制御をせずに押し動作の摩擦力を減らすことができる。また高さの位置制御を行わずに捕捉装置先端と対象物設置面との隙間を無

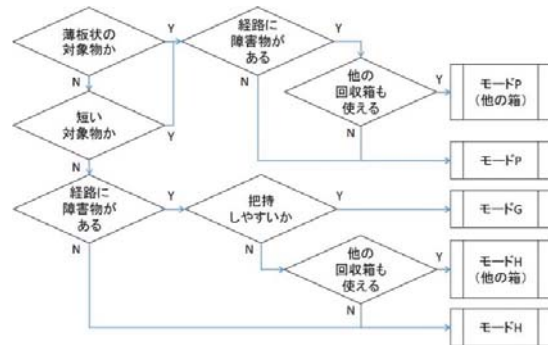


図3 動作モード決定フロー

くすことができ、コンベアのような起伏面上にある薄板状の対象物に対しても乗り越えることなく捕捉することが可能となる。またスライダの側面にはリブを取付けることもでき、押し動作中对象物が左右に逸れるのを防ぐことができる。さらに、スライダそのものを交換することでその幅も調整できる。スライダの素材は、コンベアやバンパとの摩擦を減らすためにMCナイロン製とした。

2.4 接触センサ

スライダの位置変化を検出することで、スライダと外部環境との接触状態を認識する機構である。センサが反応した時に反射的な動作経路変更をすることによって、ロボットアームへの負荷を減らすことが可能となる。スライダが障害物に乗り上げて限界まで縮められたときに反応するように、スライダ可動範囲の端部に取り付ける。スライダが斜めにスライドしても反応するように、左右に合計2つのセンサを配置する。強い接触や繰り返し接触によるセンサの損傷を防ぐため、スライダの位置を検出する光ファイバ式の赤外線センサを採用した。

3. ロボットハンドの3つの動作モード

未知形状の対象物を把持するための計画手法はいくつか研究されており、その有効性が示されている²⁾³⁾。これらの手法では対象物の3次元形状を円柱や直方体などの単純な形状(形状プリミティブ)の組み合わせとして抽象化したうえで、ハンドのアプローチ方向などの把持計画を行う。著者らの選別システムで用いる手法¹⁾でも、対象物の二次元画像から得られた外形エッジを1つの楕円プリミティブにあてはめて抽象化することで、その向きや重心位置、短軸径、長軸径を特徴量としてリアルタイムに把持計画を行うことができる。廃棄物の品目、外形の近似楕円、位置、向きなどの情報に基づいて、図3に示すフローにしたがって3つの回収動作モードの中から適切な動作モードを選択する。モードH(保持)を基本と、把持しにくい小物や薄物はモードP(掃引)とする。経路に障害物がある場合は、モードG(把持)による空中搬送に切り替える。

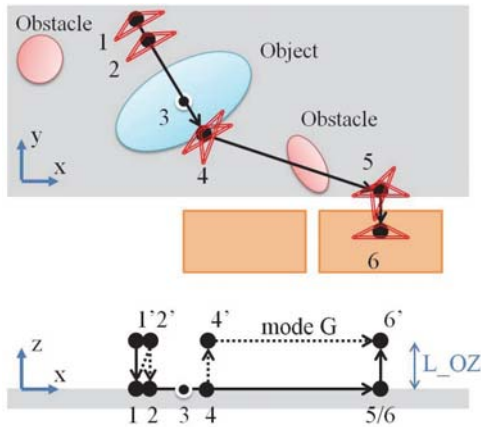


図4 動作モードH/Gでの経路計画例：黒丸は経路点を，赤い三角はハンドの向きを，矢印は経路の向きを表す。

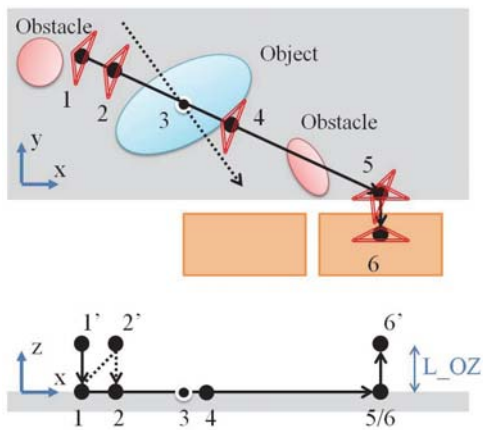


図5 動作モードPでの経路計画例

3.1 モードH (Holding)

このモードでは把持と押し動作（掃引）を同時に行う。回転ツメを使って対象物の把持を試みつつ、コンベア上に沿った経路を辿る。これにより、完全には把持できなかった場合でも、ツメによる抑えつけ（保持）や押し動作で補完することができる。ツメによる把持や保持の成功率を高めるため、経路は図4のような折れ線型とする。楕円が対象物を、実線が経路を示す。対象物の短軸方向からハンドを接近させ、保持した後は回収箱に向かって直線経路を辿る。さらに、回収箱の直前でも折れ線経路とすることで、把持できていない場合に隣の回収箱に落としてしまうことを防ぐ。また、廃棄物の量が多く密接している場合には、捕捉装置が対象物付近の別の廃棄物への乗り上げによる捕捉失敗やロボットアームへの負荷増大が懸念される。これを防ぐため、点1'から点1への動作中に他の対象物に乗上げたことを接触センサで検知した場合は、即座に点2'への経路に切り替える（乗上げ回避動作）。

3.2 モードP (Pushing)

図1のように常にツメを上げた状態で、図5に示すように対象物重心と回収箱近傍を通る直線経路に沿った押し動作を行う。これによって、ツメによる保持の成功率が比較的低い物（ツメの間隔よりも小さい物や、ツメ先端の突起幅よりも高さが低い薄物等）に対して、経路上のカーブにおける対象物の逸脱を減らすことができる。また図5に示すように、回収箱の正面から投入する折れ線経路にすることで、隣の回収箱への落下を防ぐ。経路上に障害物があった場合は、図5上段の破線のように他の回収箱候補への経路に切り替えることで回避する。またモードHと同様に、点1'から点1への動作中に他の対象物に乗上げたことを接触センサで検知した場合は、図5下段の破線に示すような点2'を経由する経路に切り替える。

3.3 モードG (Grasping)

このモードでは対象物をツメで挟み、空中搬送することで干渉を防ぐ。モードHとPはコンベア表面に沿った経路であるため、対象物が複数密接していると、移送中に他の廃棄物を巻込んで選別精度を低下させる恐れがある。このようなケースではモードGが有効である。図4の下側に示すように、対象物を把持するまではモードHと同様の経路をとり、そこから回収箱までは点4'から点6'への経路を辿ることで空中に持ち上げて移送する。特に把持しやすい長物や厚物に対して有効なモードである。

3.4 各モードの経路点算出アルゴリズム

上記3つの動作モード全てに共通して、経路は点P1～P6, P1', P2', P6'の計9点で構成する。アポストロフィの付く点は、+Z軸方向に対象物の最大高さLozだけずらした点とする。

点P1の位置は対象物近似楕円の表面から少しだけ離れた位置とし、対象物重心Po, 回収箱上の目標点Pg, 対象物の短軸角度Aos, 短軸長Los, 長軸長さLoLをもとに算出する。なおモードH/GとモードPではそれぞれ異なる算出方法を用いる。Z軸回りの角度P1Rは、対象物の短軸角度や、対象物重心からみた目標点の方位角をもとに算出する。

点P2は、P1よりも楕円表面に近い位置とする。角度P2Rは、P1Rと同じとする。

点P3は、対象物重心Poとする。角度P3Rは、直後の経路点に向かう方向とする。

点P4の位置は、対象物重心Po, 目標点Pg, 第1経路点P1をもとに算出する。角度P4Rは、直後の経路点に向かう方向とする。

点P5は、目標点Pgから任意距離Δyだけ重心側の点とする。角度P5Rは目標点に向かう方向とする。

点P6は、目標点Pgとする。

以上の法則に基づいて、ロボットの動作経路を算出する。

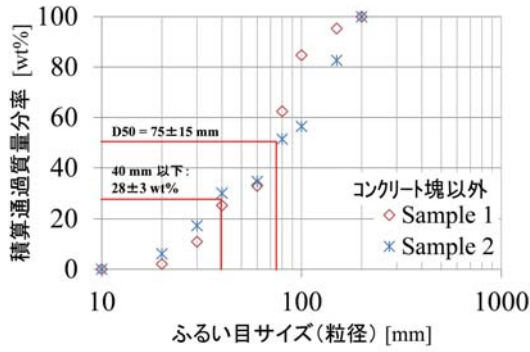


図6 解体コンクリート塊の粒径分布

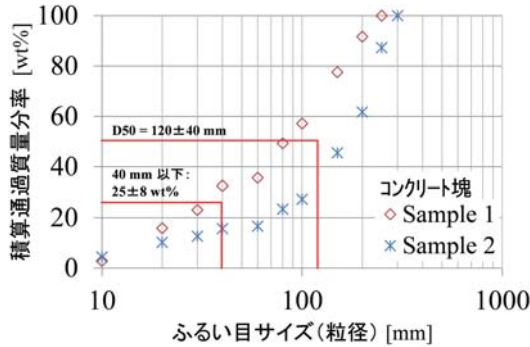


図7 コンクリート以外の建設副産物の粒径分布



図8 実験で用いた建設副産物のサンプル

4. ロボットハンドの性能評価実験

開発したハンドおよび動作モードの性能評価実験を、次のように行った。

4.1 対象物の条件

建設副産物の形状や大きさは千差万別であるものの、

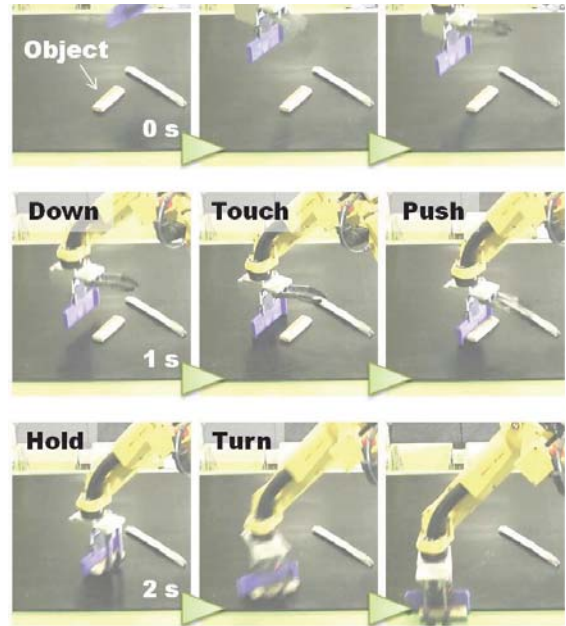


図9 動作モードHにおける回収動作例

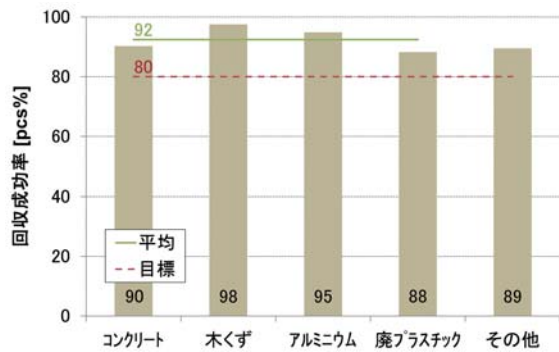


図10 動作モードHにおける回収成功率

一定の傾向がある。これを定量的に把握するため、実際の解体現場から排出された廃棄物のサイズ分布について、過去の調査データに基づいた統計分析を試みた。分析対象はコンクリート構造物の解体現場2ヶ所とした。図6にコンクリート塊、図7はそれ以外についてのサイズ分布を示す。横軸はふるい目の一辺の大きさ、縦軸はふるいを通過した質量分率である。その結果、対象物の最大長さは300 mm以下であった。40 mm以下の対象物は選別システムの前処理部分にあるロールスクリーンでふるい落とされることを考慮し、対象物の想定サイズは40~300 mmとする。全体の50 wt%が通過するふるい目の大きさ (d50) を平均サイズと考えると、コンクリート塊は120 ± 40 mm、それ以外は75 ± 15 mmであった。対象物の最大質量については、コンクリート塊の平均サイズよりも大きいコンクリート塊はロールスクリーンによって取り除かれると仮定し、直径120 mmのコンクリート塊を想定する。その形状を仮に球とすると質量は2.1 kgであることから、さらに二割の余裕を加えて2.5 kgを最大質量と想定する。

以上の分析に基づいて、対象物のサンプルは図8に示すものを用いた。実際の解体現場で採集した5品目（コンクリート塊、木くず、アルミニウム片、廃プラスチック、その他の建材）をそれぞれ30個ずつ用意した。なお鉄くずは磁力選別機で比較的容易に取り除くことができるため対象外とした。これらを幅1mのベルトコンベア上にランダムに配置して搬送し、ロボットの可動範囲に到達したらコンベアを停止させ、各動作モードによる回収動作を行なわせた。ロボットハンドはFANUC社の垂直多関節型ロボットM-10iAの先端に取り付けた。回収成功率の定義は、この動作によって回収箱への投下に成功した個数を、動作回数で割った値とした。動作回数は品目毎に30回以上ずつ試行した。対象物の位置と向きは、著者らが開発した画像判定装置⁹⁾を用いて計測した。また受動スライダの幅は200mmとした。

4.2 ツメを使った動作モードHの検証実験

図9に、モードHによるロボットアームの動作例を連続写真で示す。対象物である木くずの短軸が回収箱を向いていないため、2秒時～3秒時にかけてハンドの向きが大きく変化している。このような場合においてモードHによる回収動作を成功させるためには、対象物をツメでしっかりと把持できている必要がある。

実験結果を図10に示す。全品目を平均すると90%以上の成功率となり、目標性能を満たした。木くずとアルミニウムの成功率が高かったのは、細長く掴みやすい形状の対象物が多かったためと考えられる。また、成功率の低下要因として1) 他の対象物による障害、2) 薄物の乗り越え、3) 小物の逸脱、等があった。要因1についてはモードGを、要因2と3についてはモードPを併用することで、さらに成功率を向上できる可能性がある。また、ツメやスライダの形状にも工夫の余地が残されている

4.3 ツメを使った動作モードGの検証実験

図11に、モードGによるロボットアームの動作例を示す。金属くず（アルミニウム）をツメで把持して持ち上げることで、経路上の2つの廃棄物を巻きこまずに、対象物を回収箱へ投下できることが確認できた。

実験結果を図12に示す。その他の建材以外の4品目を平均すると39%の成功率となった。また、その他の建材は一度も回収に成功しなかった。この結果から、現状では積極的にモードGによる回収動作を行う戦略は得策でないとと言える。モードHによる回収動作を基本とし、巻き込みたくない物が経路上にあった場合に、モードGに切り替えるといった戦略が望ましい。モードHと同様に木くずとアルミニウムの成功率が高かったのは、細長く掴みやすい形状の対象物が多かったためと考えられる。その他の建材の成功率が極端に低かったのは、薄くて広い形状が多かったためと考えられる。改善点として、ツメの形状や配置を変更すること

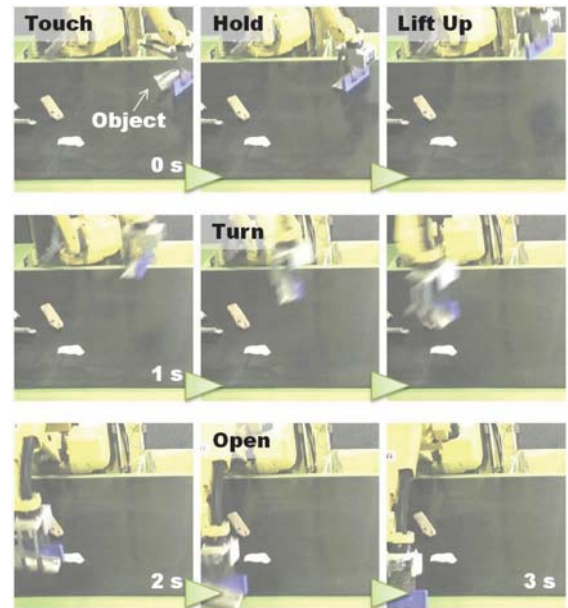


図11 動作モードGにおける回収動作例

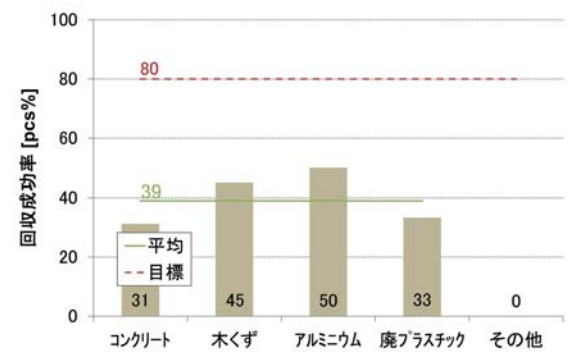


図12 動作モードGにおける回収成功率

で、成功率を高められる可能性がある。

4.4 ツメを使わない動作モードPの検証実験

図13に動作例を示す。金属くず（アルミニウム）をバンパで押すことで、最小限のハンド旋回量で対象物を回収箱へ投下できることが確認できた。動作モードHにおいて旋回時に逸脱してしまうようなケースでは、この動作モードPが有効であると考えられる。

4.4 乗上げ回避動作の検証実験

図14に乗上げ回避動作の成功例を示す。廃プラスチックを回収する動作の途中で、付近のコンクリートに0～1秒の間で乗上げたが、接触センサが正常に働き、動作をキャンセルできている。さらに、1～2秒の間で少し対象物側にハンドの位置を修正してリトライしている。2～3秒の間ではコンクリートに乗上げずに把持に成功し、対象物を回収箱へ投下できている。このように乗上げ回避動作を成功させるためには、経由点Pv2の位置をできるだけ対象物に近づけることが重要である。しかし近づけすぎると今度は対象物に乗上げてしまうため、トレードオフの関係となる。

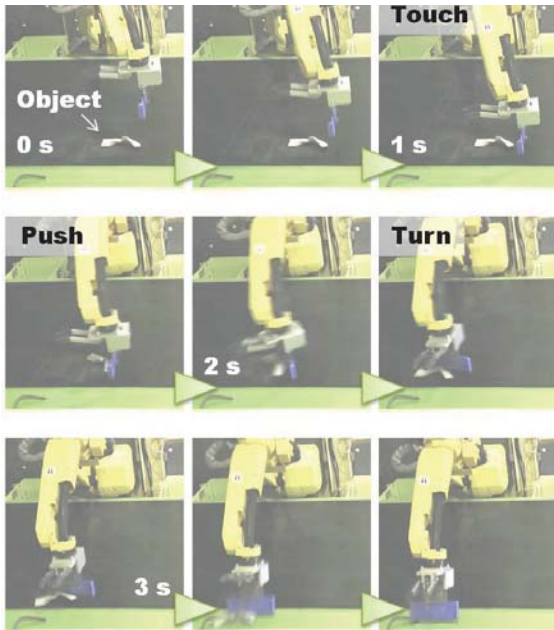


図 1 3 動作モード P における回収動作例

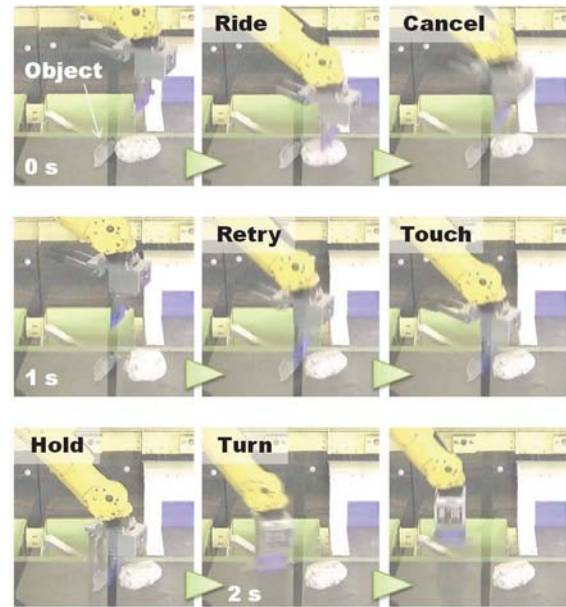


図 1 4 動作モード H における乗上げ回避動作例

5. おわりに

建設副産物を中間処理施設に移送する前に解体現場で自動選別するロボットシステムの要素技術として、コンクリートや鉄のような重量物を含む不定形の建設廃棄物の回収に適した、2本のツメを使った把持動作と、パンパによる押し動作を組み合わせることが可能なロボットハンドを設計、製作した。またその制御方法として、3つの動作モード（H：保持，G：把持，P：掃引）を構築した。これらを用いて、実際の解体

現場から採集した建設廃棄物に対する回収成功率を検証した結果、建設副産物のうち主要5品目（コンクリート塊，木くず，アルミニウムくず，廃プラスチック，その他の建材）を90%以上の成功率で選別・回収できることを確認した。また回収動作の所要時間は対象物の一個あたり3～4秒であることが確認できた。

今後はさらに成功率を高めるため、ツメやスライダの形状，動作モードの使い分け方，経路計画アルゴリズム等について，さらなる検討を加えていく。

謝 辞

本研究は、平成23～25年度環境省環境研究総合推進費補助事業（次世代）の一部として行われた

参考文献

- 1) Takuya Gokuyu, Satoru Nakamura et. al., "Sorting system for Recycling of Construction Byproducts with Bayes' Theorem-Based Robot Vision," J. Robotics and Mechatronics (JRM), Vol. 23, No. 6, pp. 1066-1072, 2011.
- 2) A. T. Miller, S. Knoop et.al., "Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 14-19, 2003.
- 3) T. Tsuji, K. Harada et. al., "Grasp Planning for a Multifingered Hand with a Humanoid Robot," J. Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 2, pp. 230-238, 2010.

ROBOT HAND VALIDATION OF SORTING PERFORMANCE TO CONSTRUCTION BYPRODUCTS FROM ACTUAL DEMOLITION SITE

Daisuke Inoue and Satoru Nakamura

We propose a robot hand mechanism for sorting construction byproducts on a belt conveyor with over 90% accuracy. The hand consists of 4 mechanisms; a tilt bumper, two claws, a passive slider, touch sensors. The byproduct that cannot be grasped is manipulated for pushing by the bumper actuated with an air dumper. The slider is on the bumper tip in order to avoid getting over the thin byproducts during the pushing motion. On the other hand, graspable objects are grasped between the claws and the bumper. If there are other byproducts in the path, it can be avoided by grasping it and lifting it into the air.