

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 2 月 24 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420181

研究課題名(和文) 力覚提示ジョイスティックによる操作型注湯ロボットの操作支援・訓練システムの開発

研究課題名(英文) Development of Operational Assistance System of Operational Pouring Robot Using Joystick with Reaction Force Display

研究代表者

野田 善之 (NODA, Yoshiyuki)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：60426492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：現在、鋳造産業における注湯工程の自動化が進められている。中小規模の鋳造工場では、多品種少量生産化に対応し、かつ作業環境を改善する操作型注湯ロボットの導入が進められている。しかし、注湯作業の臨場感が低下することから高精度注湯が困難となっている。そこで、本研究では操作型注湯ロボットの高精度注湯を実現する操作支援システムを開発した。具体的には注湯ロボットの運動方向と同じ方向に操作できる3自由度力覚提示ジョイスティックを開発した。その結果、注湯ロボットを直感的に操作することが可能になり、操作性が向上した。また、正確に湯口へ流出液体を注湯することを目的に取鍋位置決め制御システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In recent years, an automatic pouring robot has been developed in casting industry. In the small and medium-sized casting companies, the operational pouring robots are applied for realizing the high-precision pouring in high-mix low-volume production. However, it is difficult to pour precisely into the mold, because of the low realistic sensation of pouring motion on the operation site. Therefore, the operational assistance system for realizing the high-precision pouring to the operational pouring robot is developed in this study. In the results, the operability of the pouring robot is improved by applying the joystick with reaction force display which has same operational direction to the motion of the pouring robot. And, the positioning control system of ladle has been developed for pouring the liquid precisely into the sprue cup.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：自動注湯ロボット 操作支援システム 力覚提示 位置決め

1. 研究開始当初の背景

鑄造産業における注湯工程は、高温の溶解金属を鑄型へ注ぐ工程であることから、作業者にとって過酷な作業環境である。そこで、現在、注湯ロボットによる自動化が進められている。注湯工程の自動化では、図1に示す一定の注湯動作を繰り返し行う完全自動型注湯ロボットが多く採用されている。このロボットは主に、大量生産向鑄造ラインに採用されている。一方で、多品種少量生産では、それぞれの鑄型に適した注湯動作が求められることから、図2に示すような作業者が注湯現場から隔離された場所で注湯ロボットに動作指令を行う操作型注湯ロボットの導入が進められている。



図1 完全自動型注湯ロボット



図2 操作型注湯ロボット

操作型注湯ロボットは、多品種生産が進む中小規模の鑄造企業で主に用いられている。また、完全自動型注湯ロボットでも、新しい鑄型のテスト注湯や少量生産の鑄型への注湯に対して、注湯ロボットのマニュアル操作が行われている。しかし、注湯ロボットの操作は、注湯現場から隔離された環境で行われているため、従来の手動注湯よりも精度良く注湯することが困難となっている。特に、操作ミスは、注湯精度を低下させるだけでなく、図3に示すように、取鍋から流出した溶湯が湯口から外れることや溶湯を湯口から溢流させてしまい、鑄造ラインの故障や作業環境の安全性低下を招く要因となっている。また、注湯ロボットの熟練操作技能を身につけるためには、注湯ロボットの操作経験を積むことが求められる。しかし、安全性の観点から実機での操作ミスは許されず、初心者が注湯訓練の機会を得ることが困難となっている。

ここで、注湯ロボットの制御システムに関する研究は、1990年以降から活発に行われており、液面制振制御や鑄型内湯口の液面レ

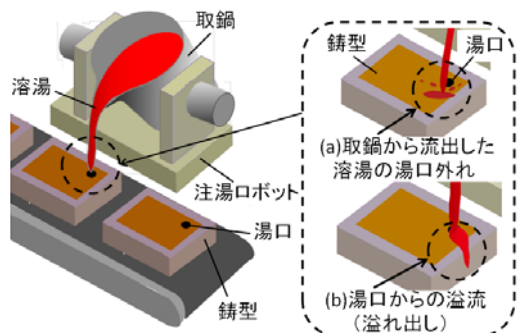


図3 誤操作による問題

ベル制御等が提案されている。しかし、従来研究の多くが、注湯プロセスを線形モデルと仮定して制御系設計を行っているため、その適用範囲は限定的であり、実用化には至らなかった。そこで、研究代表者は、流体力学に基づいた非線形注湯プロセスモデルを提案し、従来モデルよりも高精度に表現できることを示した。更に、提案モデルを基に、充填重量制御や注湯流量制御を開発し、従来技術よりも高精度な注湯制御を実現している。現在では、実用化に向けた取り組みを鑄造設備企業と進めている。このように、完全自動型注湯ロボットを対象とした制御システムの研究開発が数多く進められている。しかし、操作型注湯ロボットの制御システムに関しては、国内外問わず研究開発が進められていないのが現状である。操作型注湯ロボットの高度化には、完全自動型注湯ロボットの制御技術に加え、人と機械のインタラクション制御技術の研究開発が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が提案してきた完全自動型注湯ロボットの制御システムを基に、操作型注湯ロボットの操作支援および操作訓練システムを開発する。ここで、現行の注湯ロボットの操作機器を図4に示す。



図4 現行の注湯ロボット操作機器

注湯ロボットは前後、上下移動および取鍋傾動が可能であり、図4の操作レバーにより各動作方向へ操作指令が与えられる。しかし、このレバー操作は注湯ロボットに対して、直観的な操作が困難で誤操作を起しやす。そこで、本研究では、研究代表者が近年開発した図5に示す前後・左右・回転操作が可能で、かつ力覚提示が可能な3自由度力覚提示ジョイスティックを用いて、(1)注湯ロボットの直感的な操作、および操作者への反力提示が可能な操作機器を開発する。そして、誤操作による流出液体の湯口外れを防止するために、(2)取鍋から流出する液体の落下位置を予測し、湯口から流出液体が外れないように、



図5 3自由度力覚提示ジョイスティック

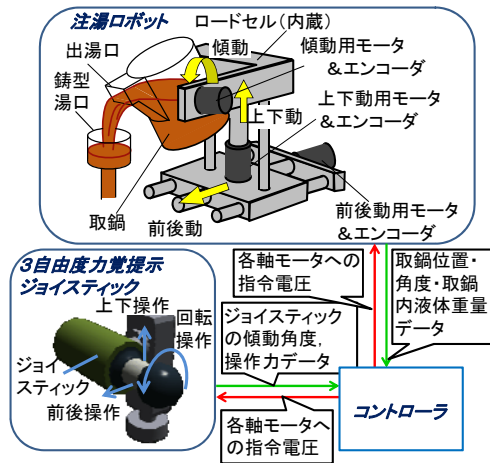


図 6 操作型注湯ロボット

取鍋前後位置の最適化を行う取鍋位置決め制御システムを開発する。開発された自動注湯ロボットの操作支援システムに対して、(3)操作性評価および注湯精度評価を行い、提案された制御システムの有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

以下に本研究で実施した研究の方法を示す。

(1) 操作型注湯ロボットの製作

力覚提示機能を有する 3 自由度ジョイスティックを伴う操作型注湯ロボットを製作する。製作する注湯ロボットの概要を図 6 に示す。ジョイスティックを横向きに設置し、注湯ロボットの動作とジョイスティックの操作方向を一致させることで直感的な操作を可能にする。このジョイスティックは、図 5 に示すようにサーボモータを内蔵しており、最大 30 N と操作力に対して十分な反力を提示する。そして、ジョイスティックの角度に応じて、注湯ロボットの取鍋搬送や傾動が行われる。

本研究で開発された操作システムの有用性を実験検証する。

(2) 湯口へ高精度に注湯する取鍋前後位置の最適化

操作型自動注湯ロボットでは操作状態に応じて注湯流量が変化するため、事前に取り鍋から流出する液体の落下位置を把握することは困難である。そこで、注湯中の注湯流量の最大値を見積もり、取鍋から流出する液体が湯口内へ最大量流入するように取鍋位置を最適化する取鍋位置決め制御システムを開発する。注湯流量数値モデル、および流出液体の落下軌跡数値モデルを用いて、想定した最大注湯流量を基に流出液体の湯口への流入量が最大となる取鍋位置を決定するシステムを開発する。

4. 研究成果

前章の研究方法を基に得られた研究成果を以下に示す。

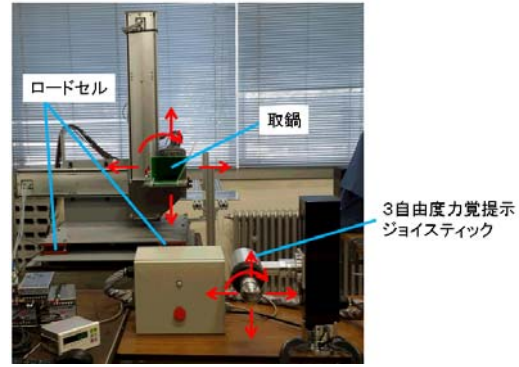


図 7 操作型注湯ロボットの外観

(1) 操作型注湯ロボット

製作した操作型注湯ロボットを図 7 に示す。3 自由度力覚提示ジョイスティックを横向きに設置し、取鍋運動方向とジョイスティック操作方向を同じにすることで、直感的な操作が可能になる。また、3 自由度力覚提示ジョイスティック内のサーボモータによって、注湯ロボット操作に対する反力提示が可能になる。また、自動注湯ロボットの最下端にロードセルを設置し、取鍋内液体の重量計測を可能にしている。

ここで、力覚提示ジョイスティックの各軸に次式のインピーダンス制御を実装している。

$$J_i \ddot{\theta}_i = -k_{pi} \theta_i - k_{di} \dot{\theta}_i + T_i, \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

(1) 式において、 J_i はジョイスティック可動部の慣性モーメントであり、 T_i は操作者からの操作トルクである。 θ_i はジョイスティック各軸の回転角度を示す。 k_{pi} はインピーダンス制御の比例ゲインを示し、 k_{di} は微分ゲインを示す。比例ゲインを増大させると反力提示が増大し、ジョイスティック操作が制限される。微分ゲインは振動を抑制することを目的に設置される。微分ゲインと比例ゲインの関係を次式に示す。

$$k_{di} = 2\zeta \sqrt{k_{pi} J_i} \quad (2)$$

ここで、 ζ は減衰比を示し、ジョイスティックの振動を抑制し、応答性を良好にすることを目的に、 $\zeta=0.7$ が与えられる。また、ジョイスティックの各軸回転角度が指令値として、自動注湯ロボットへ与えられる。ジョイスティック回転角度と指令値の関係を次式に示す。

$$u_i = K_{ii} \theta_i \quad (3)$$

ここで、 K_{ii} はジョイスティック回転角度を指令値へ変換する変換係数であり、次式のように導出される。

$$K_{ii} = \frac{V_{i\max}}{\theta_{i\max} - d_i} k_{ri} \quad (4)$$

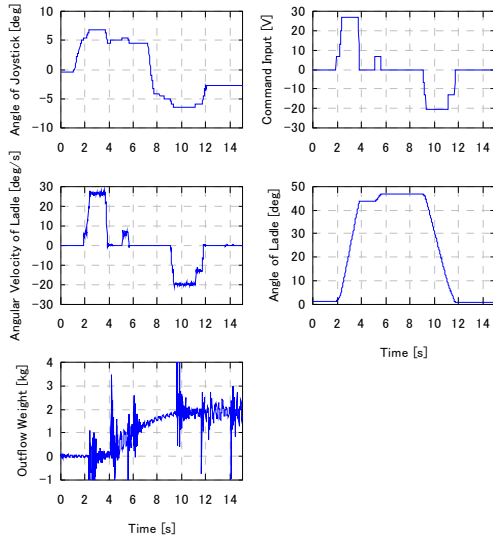


図 8 実験結果 ($k_p=8.5, k_r=1$)

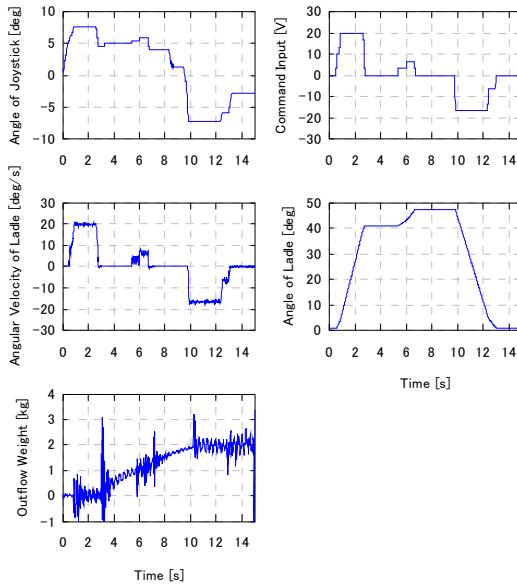


図 9 実験結果 ($k_p=15, k_r=0.5$)

V_{\max} は自動注湯ロボットの各動作軸における最大速度を示し、 θ_{\max} はジョイスティック各軸の最大回転角度を示す。 d_i はジョイスティック角度から指令値へ伝達する際の不感帯を示す。 k_{ri} は伝達率を示し、 $k_{ri}=1$ ではジョイスティック操作に対して、応答速度が高く、 $k_{ri}=0$ ではジョイスティックを操作しても自動注湯ロボットは応答しない。

上述に示した自動注湯ロボット操作システムを基に注湯実験した結果を図 8 に示す。図 8 の実験では、インピーダンス制御の比例ゲインは $k_p=8.5$ であり、伝達率は $k_r=1$ を用いている。また、操作者へは取鍋から流出する液体重量が 2kg になるように素早く注湯するように指示し、操作型注湯ロボットを操作してもらう。図 8 において、左上段図はジョイスティックの回転角度であり、右上段図は指令値を示す。左中段図は取鍋傾動角速度、右中段図は取鍋角度、左下段図は取鍋からの流出重量を示す。注湯終了後の流出重量は

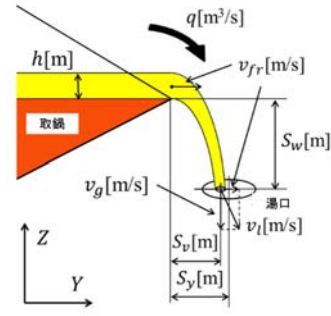


図 10 流出液体の落下軌跡

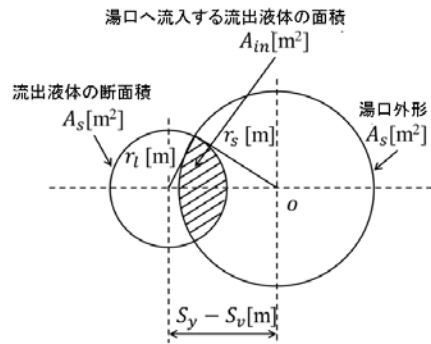


図 11 流出液体断面積と湯口の関係

1.95kg であり、注湯時間は 5.2s であった。インピーダンス制御の比例ゲインを $k_p=15$ へ、伝達率は $k_r=0.5$ へ変更した際の実験結果を図 9 に示す。図 9 のグラフの配置は図 8 と同様である。注湯終了後の流出重量は 2.01kg であり、注湯時間は 8.1s であった。これらの実験結果より、インピーダンス制御の比例ゲインを小さく、ジョイスティック回転角度から取鍋傾動角速度への伝達率を高くすることで、素早くかつ高精度に注湯できることが確認された。また、操作者へのアンケート結果により、ジョイスティック操作と注湯ロボットの運動が同一方向であることは操作しやすいとの結果を得ている。

(2) 取鍋前後位置の最適化

図 10 に取鍋から流出する液体の落下軌跡を示す。 $h[m]$ は取鍋内の出湯口下面からの液体高さを示し、 $q[m³/s]$ は注湯流量、 $v_{fr}[m/s]$ は出湯口での平均流速を示し、 $S_w[m]$ は出湯口から湯口までの高さ、 $S_v[m]$ は出湯口からの落下位置（飛距離）を示し、 $S_y[m]$ は出湯口から湯口中心までの距離を示す。図 11 では湯口付近における流出液体の断面積および湯口の関係を示している。図 10 および図 11 より、湯口内へ流入する液体流入量を次式に示す。

$$Q_{in} = \begin{cases} 0, & (|S_y - S_v| - r_l \geq r_s) \\ A_l v_l, & (|S_y - S_v| + r_l \leq r_s) \\ A_m v_l, & (else) \end{cases} \quad (5)$$

したがって、この流入流量 Q_{in} の時間積分が

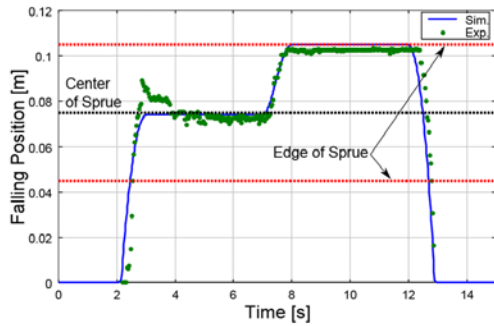


図 12 流出液体の落下位置

湯口内へ流入する液体の総重量となる。そこで、液体の流入重量が最大となる取鍋前後位置 S_{yopt} を次式のように求める。

$$S_{yopt} = \arg \max(W_{in}), \quad (6)$$

$$W_{in} = \rho \int Q_{in}(t) dt \quad (7)$$

ここで、 W_{in} は湯口内へ流入する液体重量であり、 ρ は液体密度を示す。(6)式を評価関数とした最適化を行うことで、取鍋前後位置が決定する。

上述に示した手法の実験結果を図 12 に示す。図 12 では青色実線が注湯数理モデルによる流出液体の落下位置シミュレーションの結果を示し、緑色印は実験結果を示す。2本の赤色破線は湯口端部位置を示す。この結果からも分かるように、注湯数理モデルは流出液体の落下位置を精度よく表現できることが確認され、この数理モデルを基に(6)式より導出された取鍋前後位置で注湯することで流出液体が湯口内へ流入していくことが確認された。特に、注湯流量が変化しても最大流量時に湯口内へ流入されるように設計することで湯口内への流入重量が増大することがわかる。

今後の展望として、操作型注湯ロボットにおけるリアルタイム注湯流量推定と注湯流量制御を実現し、熟練注湯技能者による注湯流量パターンの解析が課題となる。また、実用化に向けて、鑄造設備企業との実用自動注湯ロボットへの展開について議論を進めていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ①伊藤敦, 野田善之, 田崎良佑, 寺嶋一彦, 傾動式自動注湯機における出湯口の低位置化と障害物回避を考慮した流出液体落下位置制御, 鑄造工学, 査読有, 88 巻, 2016, 27-36
- ②野田善之, 伊藤敦, 寺嶋一彦, 鈴木薪雄, 太田和弘, 取鍋傾動式自動注湯機における出湯口ガイドをもつ取鍋からの流出液体の

落下位置制御, 鑄造工学, 査読有, 85 巻, 2013, 574-584

[学会発表] (計 20 件)

- ①末木裕太, 野田善之, 鈴木薪雄, 太田和弘, 取鍋傾動式自動注湯機における湯こぼれを最小化する取鍋位置の最適化, 日本鑄造工学会第 168 回全国講演大会, 2016 年 9 月 25 日, かるぽーと高知 (高知県高知市)
- ②Y. Sueki, Y. Noda, M. Suzuki, K. Ohta, Optimal Positioning of Ladle in Automatic Pouring Machine in Consideration of Maximum Entry Liquid Volume into Sprue, The 6th Korea-Japan Conference for Young Foundry Engineers, 2016 年 8 月 26 日, Korean Aerospace University (韓国ソウル)
- ③Y. Noda, M. Suzuki, K. Ohta, High-precision Automatic Pouring Machine with Adaptive Control Parameters, 72nd World Foundry Congress 2016, 2016 年 5 月 23 日, ポートメッセ名古屋 (愛知県名古屋市)
- ④末木裕太, 野田善之, 自動注湯機における取鍋出湯口位置の最適化, 日本機械学会関東学生会第 55 回学生会卒業研究発表講演会, 2016 年 3 月 10 日, 東京工業大学 (東京都目黒区)
- ⑤鈴木大輝, 野田善之, 操作型搬送機械の機械摩擦を考慮した制振位置決め制御を実現する操作支援システム, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2015 年 12 月 16 日, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)
- ⑥野田善之, 自動注湯機の高速度高精度化, 日本鑄造工学会第 167 回全国講演大会, 2015 年 10 月 23 日, 室蘭工業大学 (北海道室蘭市)
- ⑦Y. Noda, D. Suzuki, Operational Assistance System for Vibration Suppression and Precise Positioning in Manual Guided Transfer System, 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2015 年 10 月 10 日, 香港 (香港)
- ⑧D. Suzuki, Y. Noda, Operational Assistance System while Considering Operators Ability on Manual Guided Transfer System with Vibrational Elements, 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2015 年 9 月 22 日, Sydney (Australia)
- ⑨Y. Noda, S. Iwai, Positioning and Vibration Suppression Control by Shaping Operational Force in Manual Guided Transfer System, SICE Annual Conference 2015, 2015 年 7 月 30 日, 杭州 (中国)
- ⑩野田善之, 辻高明, 注湯制御におけるオンラインモデルパラメータ同定の高速度化, 日本鑄造工学会第 166 回全国講演大会,

2015年5月24日, 早稲田大学(東京都新宿区)

- ⑪ T. Tsuji, Y. Noda, High-precision Pouring Control Using Online Model Parameters Identification in Automatic Pouring Robot with Cylindrical Ladle, 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2014年10月7日, San Diego(USA)
- ⑫ T. Kuneguchi, Y. Noda, Y. Sago, K. Kakiyama, Operational Assistance System using 3-DOF Joystick with Reaction Force Display to Load Transfer Machine in a Plane, 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2014年9月2日, Vienna (Austria)
- ⑬ 辻高明, 野田善之, 寺嶋一彦, 鈴木薪雄, 太田和弘, 実用取鍋を有する傾動式自動注湯機へ適用可能なパラメータオンライン同定の開発と注湯高精度化, 日本鑄造工学会第164回全国講演大会, 2014年6月1日, 京都勸業館(京都府京都市)
- ⑭ 野田善之, 取鍋傾動式自動注湯機の流量制御における目標軌道設計, 日本鑄造工学会第164回全国講演大会, 2014年6月1日, 京都勸業館(京都府京都市)
- ⑮ 鈴木大輝, 野田善之, 制振技能獲得のための操作者の運動特性評価と制振位置決め制御, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2014年5月27日, 富山市総合体育館(富山県富山市)
- ⑯ 久根口智也, 野田善之, ジョイスティックの動的操作制限に基づく平面内3自由度搬送機械の操作支援システム, 計測自動制御学会第14回システムインテグレーション部門講演会, 2013年12月18日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)
- ⑰ T. Tsuji, Y. Noda, M. Suzuki, K. Ohta, K. Terashima, Automatic Pouring Control System by Inverse Model Control with Automatic-tuning Parameters, The 12th Asian Foundry Congress, 2013年12月10日, 台北(台湾)
- ⑱ 久根口智也, 野田善之, 力覚提示ジョイスティックによる操作制限, 日本機械学会山梨講演会, 2013年10月26日, 山梨大学(山梨県甲府市)
- ⑲ 野田善之, 取鍋傾動式自動注湯機のプロセス解析と高精度化, 日本鑄造工学会第162回全国講演大会, 2013年5月26日, 山梨大学(山梨県甲府市)
- ⑳ 辻高明, 野田善之, 寺嶋一彦, 鈴木薪雄, 太田和弘, 取鍋傾動式自動注湯機のパラメータオンライン同定と注湯制御の高精度化, 日本鑄造工学会第162回全国講演大会, 2013年5月26日, 山梨大学(山梨県甲府市)

[その他]

ホームページ等

山梨大学工学部機械工学科機械力学研究室
自動注湯ロボットの概要

http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/noda/research/pouring_robot.htm

山梨大学工学部機械工学科機械力学研究室
力覚提示ジョイスティックの概要

<http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/noda/research/joystick.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 善之 (NODA, Yoshiyuki)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：60426492

(2) 研究分担者

秋月 拓磨 (AKIDUKI, Takuma)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40632922