

平成 22 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560247

研究課題名（和文）

安全性と効率性を考慮した自律走行天井クレーン液体タンク搬送制御システムの開発

研究課題名（英文）

Development of the liquid tank transportation control system with an autonomous mobile overhead crane that considers safety and efficiency

研究代表者

兼重 明宏（KANESHIGE AKIHIRO）

豊田工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70224615

研究成果の概要（和文）：

本研究では、天井クレーンによる振動制御を考慮した液体タンクの3次元搬送制御系設計のため、まず、対象とする天井クレーンによる液体搬送実験装置の設計・製作し、ロッド・タンク連成系の液体搬送モデルを構築する。そして、そのモデルの妥当性をシミュレーションと実験により確認する。最後に、導出したモデルにより、スロッシング抑制の効果のある制御系設計とロッド・タンク連成系の形状や大きさについて考察する。

研究成果の概要（英文）：

This research presents the development of control system of 3-D transfer of liquid tank with an overhead crane considering the suppression of sloshing. First of all, we will make an overhead crane experimental equipment that has the rod-tank system. Next, the mathematical model of the rod-tank system for the liquid transfer with an overhead crane is built by the double-pendulum model considering viscosity in this research. The validity of the proposed model is verified by comparing results of computer simulation with experiment. Finally, the control method of sloshing with an overhead crane, and optimal design of shape and size for the rod-tank system is discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：機械力学・制御

科研費の分科・細目：振動制御

キーワード：搬送機器，天井クレーン，自律化，液体搬送，スロッシング，搬送制御，振動抑制

1. 研究開始当初の背景

(1)鉄鋼，鋳造業における溶解から注湯工程の溶湯搬送は，高温，悪臭などの極悪環境のもとにあり，また，地震などに対する安全面の

点からも，この危険作業から人間を解放し，システムの自動化，最適化を図っていくことは重要である。

(2)溶湯搬送の代表的な搬送方式には，台車

や無人走行車など地面を走行させるものや天井クレーンによるものがある。どちらの搬送方式についても問題となるのは、搬送する溶湯の振動（スロッシング）である。台車による地面走行の溶湯搬送については、多くの研究が行われており、振動抑制を考慮した液体搬送制御系の構築が行われてきた。

(3)天井クレーンによる液体搬送を考えた場合、液体の入ったタンクの吊り下げ用ロッドの振れやスロッシングが発生しやすく、それにより液体の溢流などの危険性が高い。また、溶湯搬送の場合、ノロなど汚物の溶湯内への巻き込みによる品質劣化を引き起こしてしまう。このため現状では、オペレータの手順運転や経験的なパターン制御によるクレーン走行が行われている。

(4)クレーン制御に関する研究は、対象を剛体としたものばかりであり、搬送物を液体としたものは少ない。また、運動方程式に基づいた数学モデルの導出にはなかった。

2. 研究の目的

本研究では、天井クレーンによる振動制御を考慮した液体タンクの3次元搬送制御系設計のため、まず、対象とする天井クレーンによる液体搬送実験装置の設計・製作し、ロッド・タンク連成系の液体搬送モデルを構築する。そして、そのモデルの妥当性をシミュレーションと実験により確認する。最後に、導出したモデルにより、スロッシング抑制の効果のある制御系設計とロッド・タンク連成系の形状や大きさについて考察する。

3. 研究の方法

(1) 対象とするシステム

図1に対象とする実験装置を示す。本装置は、走行方向(X軸)はガーダ自体が移動し、横軸方向(Y軸)はガーダ上の搬送物を吊り下げた台車(カート)が移動することにより搬送を行う自走式システムである。

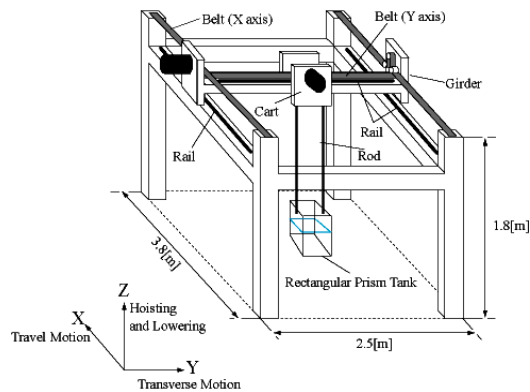


Fig.1 Experimental Apparatus

天井クレーンで液体搬送実験を行うためには、液体を入れるタンクとタンクを吊るすロッドが必要である。そこで、タンクとロッドの設計及び製作を行った。実際に製作した装置を図2に示す。タンクはアクリル製の直方体タンク(200×200×300mm)であり、2本のロッドによって吊り下げられている。

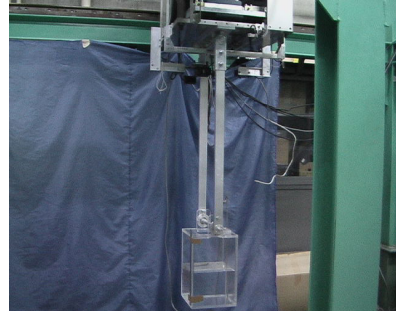


Fig.2 Rod-tank Crane System

(2) 天井クレーンによる液体搬送モデルの構築

対象とする実験装置はX,Yの2次元の搬送方向へ自由に移動することができる。実際の溶湯搬送においても、2次元の搬送が行われているため、2方向の液体振動について考える必要がある。ここでは、X,Y軸のそれぞれの搬送方向についてモデルを導出し、実験との比較によってモデルの妥当性について検討する。なお、対象とする液体振動は1次元モードのみとする。

Y軸方向の液体搬送モデルの構築

Y軸方向の搬送では、装置の構造上、ロッドの振れが生じないことから、液体搬送モデルを従来研究で用いられている図3の単振り子型のスロッシングモデルで近似する。このモデルの運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{\theta} = \frac{l}{l} \ddot{y} - \frac{c}{m} \dot{\theta} - \frac{g}{l} \theta \quad (2)$$

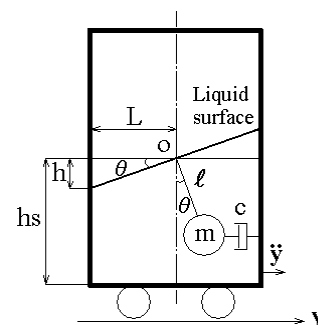


Fig.3 The Simple Pendulum-type Sloshing Model

なお、 l は等価振り子長さ、 m はタンク内液体の質量、 θ は液体の振れ角、 c は液体自身

の粘性及び液体と容器壁面の摩擦を考慮した等価粘性係数である。

また、次式より液体の固有振動数を推定することが可能である。

$$f_n = \frac{\sqrt{g\kappa \tanh(kh_s)}}{2\pi} \quad \omega_n = 2\pi f_n \quad (3)$$

ただし、 $\kappa = (n/l_s)$ 、 $n = 1, 2, \dots$ であり、ここで、 n はモードの次数、 l_s はタンクの搬送方向長さ、 h_s は液体の静止液位である。

また、タンク搬送に関するモータモデルは次式で表される。

$$V(s) = \frac{K\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} U(s) \quad (4)$$

式(4)における固有振動数 ω_n や減衰係数 ζ は、台車の動きを超音波センサで測定し、カーブフィッティングを行って求めた。

X軸方向の液体搬送モデルの構築

X軸方向の液体搬送は、モデル導出簡単化のため、ロッド・タンクの結合部を固定して行う。ロッド振動と液体振動を有するロッド・タンク連成系において、ロッドの振動は、ロッド回転軸からタンク重心までの距離をロッド長とするクレーンモデル(質点単振子モデル)に近似できる。また、スロッシングは直方体タンクの場合、急激な加速度変化などが起こらない限り、2次元1次モードスロッシングとして近似的に表現できるので、図3に示すような単振子型のスロッシングモデルで考えることができる。

この2つのモデルを合成することで、直線搬送における結合部を固定した場合のロッド・タンク連成系の近似モデルとした。2つのモデルを合成すると、図4のような減衰2重振子系となる。

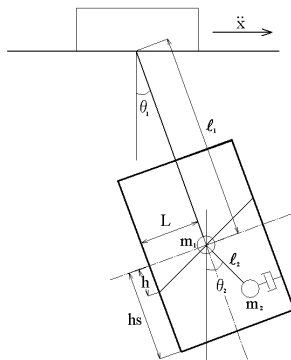


Fig.4 Double-Pendulum Model Considering the Viscosity

実際の系において、ロッド・タンク連成系および液体は質点ではなく、それぞれ重心回りに慣性モーメントを生じる。とくにX軸方

向搬送においてはロッドの振れが生じるため、慣性による影響が大きくなり、質点振子によるモデルでは液体振動を正確に表現することができない。

そこでロッド・タンク連成系、液体の重心回りの慣性モーメントを考慮し、液体搬送モデルの導出を行った。その運動方程式は式(5)で示される。

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 &= \frac{m_2^2 l_1 l_2^2 - (m_1 + m_2) l_1 l_2}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \ddot{x} - \frac{(m_1 + m_2) g l_1 l_2}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \theta_1 - \frac{D l_2}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \dot{\theta}_1 \\ &\quad + \frac{m_2^2 g l_1 l_2^2}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \theta_2 + \frac{m_1 l_1 c}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_2 &= \frac{m_2 (m_1 + m_2) l_1^2 l_2 - m_2 l_1 l_2}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \ddot{x} + \frac{m_2 (m_1 + m_2) g l_1^2 l_2}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \theta_1 + \frac{m_2 l_1 D}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \dot{\theta}_1 \\ &\quad - \frac{m_2 g l_2 l_1}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \theta_2 - \frac{c l_1}{I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_2^2} \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $I_1 = (m_1 + m_2) l_1^2 + i_1$ 、 $I_2 = m_2 l_2^2 + i_2$ である。 i_1 はロッド・タンク連成系の重心回りの慣性モーメント、 i_2 は液体の重心回りの慣性モーメントを表す。また、式(5)において l_1 はロッド・タンク連成系の重心までの距離、 l_2 は等価振り長さ、 m_1 、 m_2 はロッド・タンク連成系及び水の実測重量、 c は液体自身の粘性及び液体と容器壁面の摩擦を考慮した等価粘性係数、 D は回転支点部の粘性係数である。式(5)における I_1 、 I_2 は、2重振子モデルにおける質点モデルの項であり、 i_1 、 i_2 を加えることで、重心回りの慣性モーメントを考慮することができる。

(3) 2次元搬送によるモデルの検証

簡単な2次元搬送として各軸に同じ入力を与える斜行搬送を行い、各軸搬送方向で構築したモデルの2次元搬送における妥当性の検証を行った。

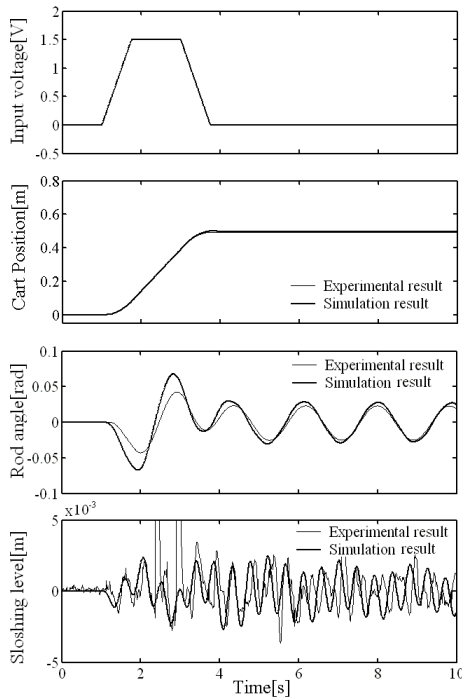
実験条件は、搬送液体として水を使用し、ロッド長は0.6m、静止液位を0.15mとした。このときこのとき $l_1 = 0.795\text{m}$ 、 $l_2 = 0.0649\text{m}$ 、 $m_1 = 6.70\text{kg}$ 、 $m_2 = 6.00\text{kg}$ 、 $c = 0.02\text{Ns/m}$ 、 $D = 0.30\text{Ns/m}$ である。

実験の液体に水を使用する理由は、水と浴湯で用いられるアルミニウム、鋳鉄の動粘性係数がほぼ等しいため、同じ搬送長さをもつタンクで同じ搬送速度で運べば、レイノルズ数の相似性により両者はほぼ同じ流動形態を示すものと考えられるからである。

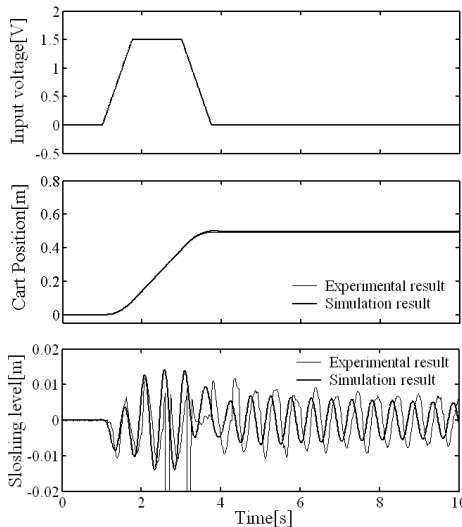
図5は加減速時間0.75sの台形速度入力を各軸に与え、斜行搬送を行った場合の実験値とシミュレーション結果の比較である。

図5において、Y軸方向搬送については、液面振動の実験値の振動傾向がY軸の単軸搬送時とほぼ同じであり、シミュレーション結果と良好に一致している。一方、X軸方向搬送については、ロッド振動は単軸搬送時と同じ振動となり、液面振動は残留振動部に高次

振動が現れているが、全体的な振動傾向は良好に表現できていることがわかる。以上のことから、本研究で構築した各軸方向の液体搬送モデルは、斜行搬送のような簡単な2次元搬送において妥当性があると言える。



(a) Transfer Direction of X



(b) Transfer Direction of Y

Fig.5 Experimental Result and Simulation Result in Diagonally transfer

(4) 制振制御とロッド・タンクの最適設計

導出したモデルに基づき、制振制御の中でも簡単に制御系が構築でき、且つ高い制振効果のあるノッチフィルタを使用した制振制御シミュレーションを行い、スロッシング抑制の効果について考察する。ノッチフィルタ

の伝達関数は次式で示される。

$$G(s) = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \omega_n + \omega_n^2} \quad (5)$$

ここで、

$$\omega_n > 0, \quad 0 < \zeta_n \leq 0.707 \quad (6)$$

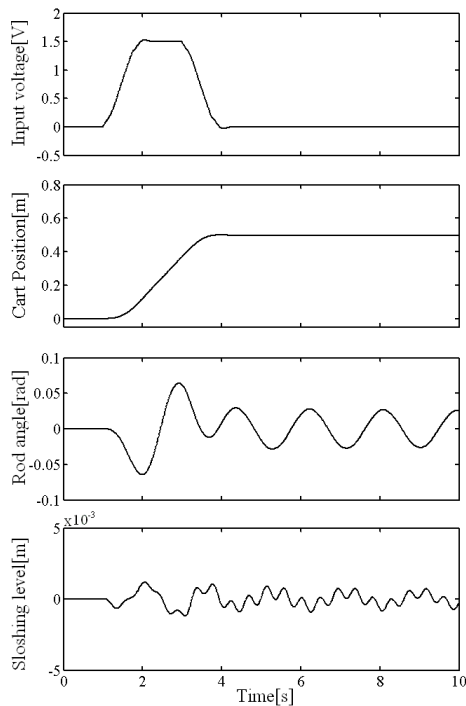
ζ_n に対する制約は、式(5)の伝達関数がピークを持つための条件である。このフィルタは、振動数が ω_n の時に下向きにピークを持つ。今回は $\zeta_n = 0.0001$ としてノッチフィルタを整形する。 $\omega = a\omega_n$ (a は ω と ω_n の比)とすると、 $0.9 < a < 1.1$ では、を相対的に最低 20 dB 低く整形することができる。

また、液体の1次モードスロッシングを制振の対象としたノッチフィルタを構築するので、1次モードでの固有振動数を求める。式(3)より、静止液位 0.15m の時の液体の固有振動数は $\omega_n = 12.29$ rad/s となる。

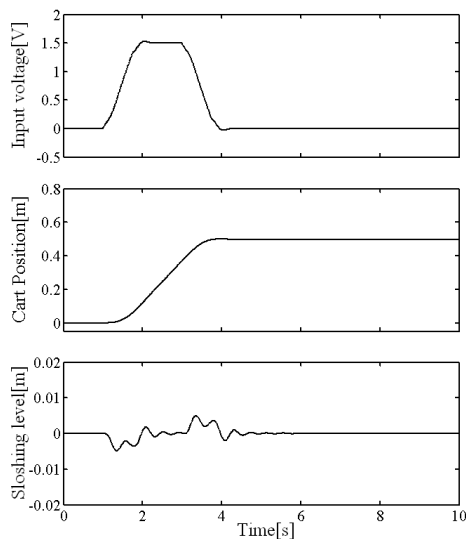
このノッチフィルタを使用して、図5と同じ条件の搬送で制振制御シミュレーションを行った。その結果を図6に示す。

図6からX,Y軸方向共に1次モードスロッシングの振幅が抑えられており、十分な制振効果が得られていることわかる。X軸方向については、ロッド振動による振動成分が現れているが、全体の振動振幅がY軸方向に比べて小さいため、この程度の振動であれば、制振を行う必要はないと考える。ただし、ロッドの振動を制振する制御系を設計する場合には、ノッチフィルタによって、立ち上がり、加減速の終了時の入力整形にゆがみが生じ、液体に高次振動が発生する可能性を考慮する必要がある。今後の課題として、本モデルに基づくフィードバック制御系の構築が望まれる。

また、スロッシング特性は、導出したモデルのロッド長さ、タンクの形状により検討することができる。ロッド長さに関するパラメータは導出した式(5)のモデルにおける l であり、タンクの形状に関するパラメータは式(3)における l_s である。これら2つのパラメータはそれぞれロッド・タンク連成系、液体の固有振動数を決定するパラメータであるから、2つのパラメータの周波数関係を考慮することで、振動抑制に最適なロッド長さ及びタンク形状を決定することができる。例えば、ロッド長さが短く、タンクの搬送方向長さが長い場合には両者の1次モード固有振動数が近くなり、共振して大きなスロッシングが発生する可能性がある。したがって、ロッド長さは長くして固有振動数を低周波域に、タンクの搬送方向長さは短くして固有振動数を高周波域になるように設計することでスロッシングの振動振幅をある程度抑制することが可能である。



(a) Transfer Direction of X



(b) Transfer Direction of Y

Fig.14 Simulation Result of Diagonally Transfer Using Notch Filter

また、振動抑制を考慮したロッド、タンクの最適設計を行うためには、ロッド・タンクの結合部についても考察する必要がある。本研究においてはロッド・タンクの結合部は固定として考察を行ってきたが、この場合、液体の振動はロッドの動きによって決まる。一方、著者らはロッド・タンクの結合部を自由にすることで、全体的に液体の振動振幅を抑える効果があると考察している。これは、

回転軸を自由にした場合、ロッドの1次共振周波数付近でタンクも共振し、タンクの動きにしたがって液体は振動するが、タンクの振動がロッドの振動よりも小さいので、結合部を自由にするるとこの周波数付近での液体の振動が低減化されるからである。

このように、ロッド、タンク及び液体の共振周波数付近において液体の振動振幅を抑えられるような周波数関係となるようにロッド長さ、タンク形状およびロッド・タンクの結合部を決定することで、スロッシング抑制効果のあるシステムを設計することができる。

4. 研究成果

本研究では天井クレーンにおける液体タンクの搬送システムの開発に対して、以下のことを行った。

(1) Y軸方向搬送においては、単振子型スロッシングモデルで液面振動を近似する方法を提案し、モデルの導出、妥当性の検証を行った

(2) X軸方向搬送においては、慣性モーメントを考慮した2重振子モデルでロッド振動及び液面振動を近似する方法を提案し、モデルの導出、妥当性の検討を行った

(3) 系のスロッシング特性は、ロッド長さとタンク形状により決定され、導出したモデルにより検証することができる

(4) 2重振子モデルにおける液体振動挙動の理論的な検討とタンク形状やロッド長さの変更による液体振動挙動解析を行った

(5) 液体搬送システムの設計指針の知見を得た

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

A.Kaneshige, T.Miyoshi and K.Terashima: The Development of an Autonomous Mobile Overhead Crane System for the Liquid Tank Transfer, Proc.of 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Singapore, CD-ROM, (2009), pp.630/635, 査読有り

A.Kaneshige, N.Kaneshige, T.Miyoshi and K.Terashima: Modeling for 3-D Transfer of Liquid Tank with an Overhead Crane Considering the suppression of Liquid Vibration, Proc.of 9th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, Quebec, CANADA, CD-ROM, (2008), 査読有り

A.Kaneshige, N.Kaneshige, S.Hasegawa, T.Miyoshi and K.Terashima: 3-D Transfer of Liquid Tank with an Overhead Crane

Considering the Suppression of Liquid Vibration, Proc. of 10th Asian Foundry Congress(AFC10), Nagoya, Japan, (2008) pp. 560/565, 査読有り

A. Kaneshige, N. Kaneshige, S. Hasegawa, T. Miyoshi and K. Terashima: Model and control system for 3-D transfer of liquid tank with overhead crane considering suppression of liquid vibration, International Journal of Cast Metals Research, Vol. 21, No. 1-3, (2008), pp. 293/29, 査読有り

A. Kaneshige, Shigeo Hasegawa and K. Terashima: The Development of an Autonomous Mobile Crane System Considering On-line Obstacle Recognition and Path Planning, International Journal of Automation Technology, vol. 2, No. 2, (2008), pp. 131/140, 査読有り

〔学会発表〕(計 11 件)

兼重明宏: 音源情報を用いた障害物回避移動ロボットの開発, 第 10 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, (2009), pp. 332/335.

兼重明宏: 天井クレーンによる液体タンク搬送制御系設計に関する研究(タンク内液体挙動の解明とロッド・タンク連成系の最適設計の検討), 日本鑄造工学会第 155 回全国講演大会講演概要集, (2009), pp. 79.

三好孝典: 技科大一高専間の遠隔制御実験を伴った出前授業, 日本高専学会第 15 回年会講演会論文集, (2009), pp. 115/116.

兼重明宏: 音源方向定位を用いた障害物回避ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, (2009), CD-ROM, 2A2-E14.

今村孝: 高専 - 豊橋技科大間における遠隔制御システムを用いた体験型学習, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, (2009), CD-ROM.

粕谷悠介: 移動方向と障害物位置情報を用いた自律型移動ロボットの開発, 第 51 回自動制御連合講演会講演論文集, (2008), pp. 790/793.

兼重明宏: 液面振動抑制を考慮した天井クレーンによる 3 次元液体搬送モデルの導出, 第 8 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, (2007), pp. 403/404.

兼重明宏: 搬送システムの自動化, 日本鑄造工学会東海 YFE フォーラム '08, (2008), pp. 1/2.

兼重明宏: 天井クレーンによる液体搬送システムのモデリングと制御, 日本鑄造工学会第 152 回全国講演大会講演概要集, (2008), pp. 119.

三宅一誠: 高専・豊橋技科大間における位

置-力帰還型バイラテラル制御を用いた遠隔制御実験, 自動制御連合講演会 (2007), (CD-ROM).

兼重明宏, 寺嶋一彦: オンラインの障害物認識, 経路計画, 搬送制御を考慮した天井クレーンの自律化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, (2007), CD-ROM, 2A2-G07.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

兼重 明宏 (KANESHIGE AKIHIRO)
豊田工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 7 0 2 2 4 6 1 5

(2) 研究分担者

藤本 浩 (FUJIMOTO HIROSHI)
徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・助教
研究者番号: 0 0 3 1 1 0 8 5
(H19 H20 連携研究者)
三好 孝典 (MIYOSHI TAKANORI)
研究者番号: 1 0 3 4 5 9 5 2
豊橋技術科学大学・工学部・准教授
(H19 H20 連携研究者)

(3) 連携研究者

なし