

(登録番号)

研究代表者 静岡大学工学部機械工学科 准教授 松丸隆文

## [研究の目的]

人と同じ生活空間・作業現場で動作する人間共存型のロボットにおける情動的な対人親和性の向上を目的として、移動ロボットのこれからの行動・意図を、周囲にいる人にわかりやすく予告・表示する機能・手法と装置（不要な人にも伝達され周囲の静寂を乱す音声以外の方法）を開発して評価する。

少子・高齢社会の到来とともに、高齢者・身障者の介護・介助支援だけでなく、人々の日常生活支援のために、ロボティクス・メカトロニクス技術の適用や実用化が期待され、人と同じ生活空間・作業空間で動作する人間共存型ロボットが増加している。しかし人工物であるロボットでは、特別な配慮がなければ、これからの動作を外見から人が判断することは難しい。そこでロボットのこれからの行動を、そのように動く前に周囲の人に知らせる、予告表示の機能を考える。

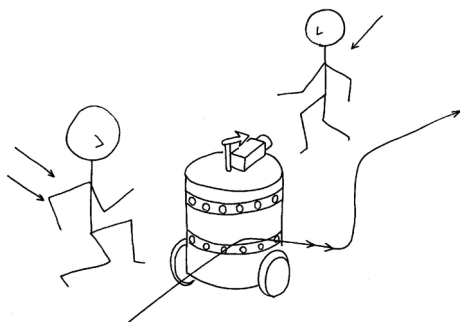


図1 これからの動作の予告表示

## [研究の内容, 成果]

### 1. 提案する方法

移動ロボットや輸送機械が人との接触や衝突を避けるには、2つの情報（移動速度と移動方向）の予告表示が必要だと考え、これらを伝達するための2タイプ・4種類の方法を提案した(表1)。

(1) これから先のある時点の状態を予告表示

(a) ランプ方式： 複数個のランプをロボット上に設置する。これから動こうとする方向のランプを点灯して移動方向を予告し、またランプの色や点滅周期を変えて移動速度を表示する。

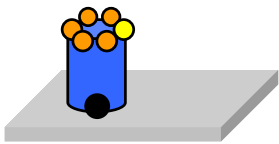
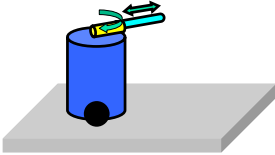
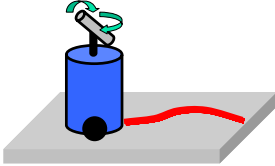
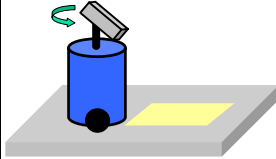
(b) 吹き戻し（伸縮矢印）方式： 筒に息を吹き込むと伸展するおもちゃ・小道具である吹き戻しを、旋回する台に載せてロボット上に設置する。吹き戻しの長さで移動速度を、その向きで移動方向を表現する。

(2) 現在からある時点までの動作を連続的に予告表示

(c) 光線方式： 光源を例えばパン・チルト2自由度機構の先端に取り付けて振ることで、走行面上に光点の残像として予定経路を描画する。何秒後までの経路を描画するかをあらかじめ決めておくので、経路の長さが移動速度をあらわし、描画された経路が移動方向を直接あらわす。ある位置まで移動するとき、最短経路を直進するのか、迂回したりどこかを經由するのか、など途中の状態を表示できることが特徴である。

(d) 投影方式： プロジェクタをロボット上に

表1 考案している予告表示方法

(1)ある時点の状態を予告表示		(2)ある時点まで連続的に予告表示	
(a)ランプ	(b)吹き戻し	(c)光線	(d)投影
 <p>上面に複数のランプを配置し点灯（移動方向）．色や点滅で移動速度も表示可能．</p>	 <p>矢印の向きで移動方向、矢印の長さで移動速度、2種の情報を同時に表示．</p>	 <p>光線+2自由度機構で予定経路を描画．途中の状態（経路など）も表示可能．</p>	 <p>プロジェクタで映像を投射．経路だけでなく時間-位置関係や他の情報も表示可能．</p>

設置し、走行面に2次元画面を投影する．画面には予定経路だけでなく、停止や後退などの動作状態も予告できる．またバッテリー残量、過熱機器や消耗部品に対する警告など、ロボットの内部状態も提示できる．

## 2. ハードウェアの開発

まず、これからの動作の予告表示の有効性と予告のタイミングなどを、ソフトウェア・シミュレーションでの被験者実験により検討した．その結果、1.0～1.5秒前が最適なタイミングであることがわかり、さらに連続的な表示はわかりやすいが、ロボットを見る人の立ち位置などによっては描画経路にある程度の長さが必要であることもわかった．このシミュレーションによる検討から、4つの方法の特徴や動作の予告表示の有効性が確認できた．そこでそれを踏まえて、提案方法を具現化する4台のロボットを開発した．

### (1) PMR-2（全方向ディスプレイ）

PMR-2は、ランプ方式（表1(a)）を具現化したロボットである．2輪駆動型の移動機構の上に、全方向ディスプレイを設置し、そこに表示される目玉の形状と位置で、これから先のある時点の状態を予告表示する（表2(a)）．

事前に知識がなくとも意味や内容を類推しやすくするために、表示する絵柄を“目玉”にした．視線は人どうしても相手の行動意図を予測

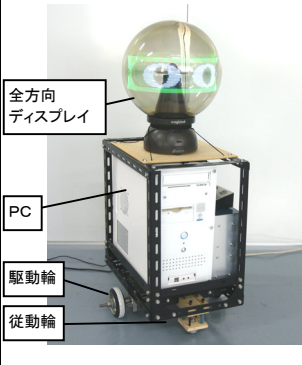
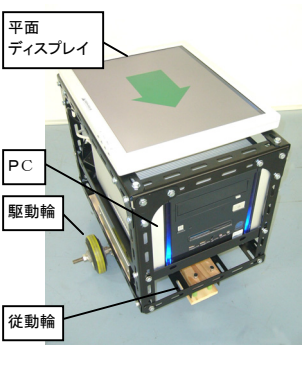
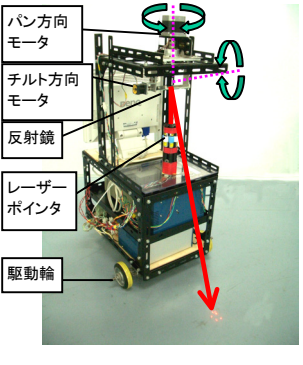
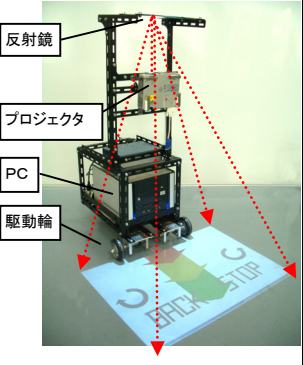
するときの手掛かりのひとつである．ロボットを人に似せて親しみやすくしたいというねらいもある．表示する移動速度は標準・低速・停止の3種類、移動方向は直進・大回り・小回り・その場旋回の4種類である．移動速度は目玉の開閉度合いで表現する：すなわち、高速では目玉を全開、低速では目玉を半開、停止では目玉を閉じる．移動方向は目玉の表示位置で表現する：すなわち、直進では正面から0度、大回りでは正面から30度、小回りでは正面から60度、その場旋回では正面から90度の場所に表示する．

### (2) PMR-6（平面ディスプレイ）

PMR-6は、吹き戻し方式（表1(b)）を具現化したロボットである．吹き戻しを模擬した何らかの機構の代わりに平面ディスプレイを用いて、そこに表示される記号や文字で、これから先のある時点の状態を予告表示する（表2(b)）．

吹き戻しを伸縮矢印と見なして、表示する基本的な絵柄を“矢印”にした．矢印は方向を示すときに日常的によく用いられるので、動作を表現する記号として初見でもわかりやすいと考えた．移動速度は矢印のサイズと色で表現する：すなわち、高速では大きな緑色の矢印、低速では小さな黄色の矢印、停止では赤色でSTOPの文字を表示する．移動方向は矢印の曲がり具合で表現する：すなわち、直進では真直ぐの矢印、大回りではゆるく曲がった矢印、小回りではきつく曲がった矢印、その場旋回ではまるく

表2 試作した予告表示ロボット

(1)ある時点の状態を予告表示		(2)ある時点まで連続的に予告表示	
(a)PMR-2	(b)PMR-6	(c)PMR-1	(d)PMR-5
			

なった矢印を表示する。後退時にはBACKの文字を表示する。

(3) PMR-1 (レーザーポインタ)

PMR-1は、光線方式(表1(c))を具現化したロボットである。鏡で反射された光線が走行面に照射され、鏡をステッピング・モータでパン・チルト方向に往復運動することで、光点の残像として“予定経路”を描画する(表2(c))。

予定経路を描画する時間はあらかじめ決めておく。移動速度が0.2[m/s]でも、現在から3秒までの経路を描画できるように、パン・チルト方向の動作範囲を設定した。走行面上に照射された光点が十分に明るく見えるならば反射鏡の往復動作はできるだけ早いほうがよいが、あまり明るくない光点を早く動かすと逆に視認性が悪くなる。そこで反射鏡の往復動作の周期は最大2[Hz]とした。したがって移動速度は描画された経路の長さで表現され、移動方向は描画された経路そのもので表現される。速度の変化は、7本のレーザーポインタをオン/オフして光点の明るさや形状を変えることでも表現できる。

(4) PMR-5 (プロジェクタ)

PMR-5は、投影方式(表1(d))を具現化したロボットである。移動機構の前部にプロジェクタを設置し、画面を走行面に投影する(表2(d))。

投影される画面の主な内容はここでも“予定経路”である。投影画面のサイズとロボットの

走行性能を考えると、据え付けたプロジェクタと反射鏡で、画面の中に3秒後までの予定経路を表示できる。3秒分の予定経路をひとつの矢印で表わすと、その長さで3秒間の平均速度しかわからないので、秒ごとに色分けしてつなげた3つの矢印として表示する。ロボットの間近になるほど緊急度が上がると考え、交通信号機を参考にして、現在から1秒後までの矢印は赤色、1~2秒後の矢印は黄色、2~3秒後の矢印は緑色とした。矢印は自在に曲げて経路を表現し、さらに早く動くときほど危険度が上がると考えて、移動速度に応じて矢印の横幅も調整する。また投影画面には動作状態も表示する。その場旋回の場合は回転方向に応じて対応する矢印記号を画面の左右に表示する。後退、停止を予告するためのBACKとSTOPの文字も、画面内に表示する。標準の白色背景に加えて、投影面が明るくとも視認性を保つために黒色背景の画面も準備した。

3. 評価 (1) アンケート

開発した4台のロボットのこれからの移動速度と移動方向の予告表示のわかりやすさを評価するためにアンケートを実施した。特に性別や年齢によって評価が異なるかに注目した。

4台のロボット(目玉ロボットPMR-2, 矢印ロボットPMR-6, 光線ロボットPMR-1, 投影ロボットPMR-5)を、2005国際ロボット展(11月30日~12月03日, 東京国際展示場)に出展した。背景と目的, 提案する方法, ロボットの構成などを

表3 評価値の平均点

	PMR-2 (目玉ロボ)		PMR-6 (矢印ロボ)		PMR-1 (光線ロボ)		PMR-5 (投影ロボ)	
	移動速度	移動方向	移動速度	移動方向	移動速度	移動方向	移動速度	移動方向
Total	2.87	3.37	3.56	3.98	2.53	2.84	3.91	4.46
Male	2.86	3.38	3.53	3.98	2.52	2.84	3.87	4.42
Female	3.04	3.35	3.79	4.04	2.91	3.09	4.43	4.79
10-19	3.00	4.14	4.00	4.50	2.29	2.71	4.43	4.57
20-29	2.57	3.34	3.39	3.96	2.55	2.63	4.01	4.50
30-39	2.97	3.17	3.65	3.97	2.10	2.49	3.86	4.52
40-49	2.54	3.15	3.32	3.66	2.77	3.10	3.84	4.47
50-59	3.08	3.59	3.86	4.35	2.85	3.33	4.07	4.38
60-	3.67	3.80	3.50	3.80	3.04	3.21	3.69	4.38

説明したのちに、ロボットが動作する様子を見てもらい、来場者にアンケートへの回答をお願いした。アンケートは主に、それぞれのロボットにおける移動速度と移動方向のわかりやすさの5段階評価(わかりにくい:1~わかりやすい:5)である。4日間で約200名から回答を得た。評価点の平均値を表3に示す。

4台のロボットに対する評価値として取得したデータを一元配置分散分析したところ、5%の有意水準で4つの標本の母集団の母平均に有意な差があることがわかった。すなわち、4つのロボットにはわかりやすさ/わかりにくさで差があり、男女とも、どの年齢層でも、投影ロボットPMR-5が最も高い評価点を獲得した。一方、親しみやすい表現として目玉ロボットPMR-2を、また一度に提供される情報量が少ない単純な表現として矢印ロボットPMR-6を、特に若年層や高年齢層の一部が高く評価した。男女別では女性が、速度に応じた矢印サイズの変化に好意的であることが目立った。

#### 4. 評価 (2) 対人模擬環境実験

人とロボットがごく近くに共存しなければならない現実に近い状況を設定した2種類の実験をおこなった。なお実験では、これから先のある時点とは1.5秒後、現在からある時点までも1.5秒後までを予告表示することにして、4台のロボットで表示のタイミングの条件をそろえた。

##### (1) すれ違い実験

狭い通路で人とロボットがすれ違う際の動きを、モーションキャプチャで計測する(図2(a))。通路(幅1.8[m]のラインの内側)の向かい側から36[cm/s]で、左右のどちらかに人を避けながら進むロボットに対して、被験者には60[cm/s]で進みながら、予告表示を見ることでロボットとぶつからないように避けてもらう。ロボットとすれ違うときの人の動きを計測して、予告表示の有無や種類による人の動きの変化を比較する。今回はロボットと人の間の距離と人の移動速度の変化に着目した。

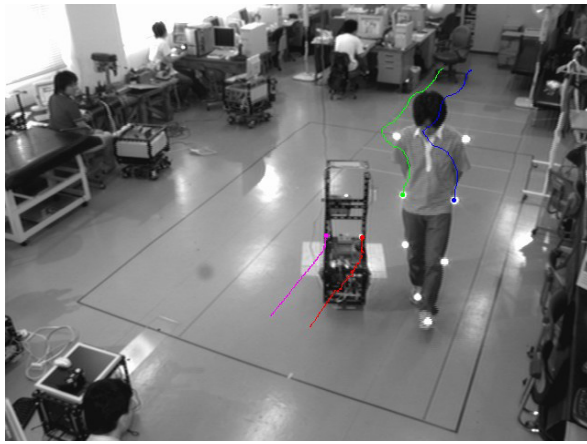
6人の被験者が3回ずつ試行した平均値で通常歩行時と回避時の速度差を比較すると、これから先のある時点の状態を予告表示するものの方が、速度差が小さくなった。これは、1.5秒後までの経路表示よりも、1.5秒後にロボットが左右のどちらに曲がるのかを瞬時に示すほうが、人は回避しやすかったのだと考える。

##### (2) 位置予測実験

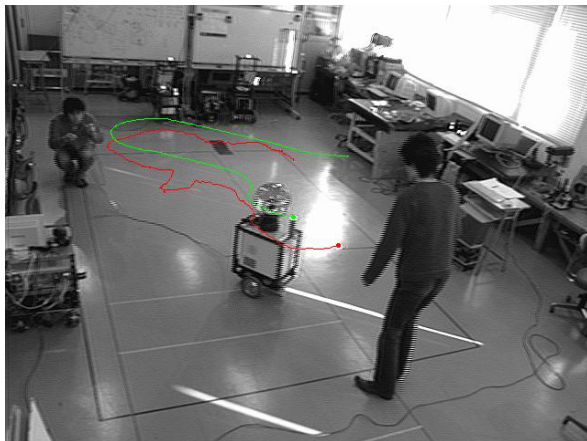
ロボットの1.5秒後の位置について、人の予測と実際の動作とのズレをモーションキャプチャで計測する(図2(b))。ロボットは4.5×3.0[m]の範囲内をランダムに動く。被験者には予告表示を参考にして予測した1.5秒後のロボットの位置を、棒で指示してもらう。予告表示の有無や種類によるズレの大きさを比較する。

8人の被験者が1回ずつ試行した平均値で予測と実際のズレを比較すると、現在からある時点までの予定経路を予告表示するロボットのほう





(a) すれ違い実験



(b) 位置予測実験

図2 対人模擬環境実験

が、ズレが小さくなった。これは、1.5秒後にどちらに曲がるかを示すよりも、1.5秒後までの経路を示すほうが、ロボットの動きを正確に伝えることができるためだと考える。

これらの実験結果から、どのロボットでも予告表示の効果を確認できたとともに、これから先のある時点の状態の予告表示は、単純な情報を素早く予告できること、また現在からある時点までの予定経路の予告表示は、複雑な情報を正確に予告できることがわかった。

#### [今後の研究の方向，課題]

ロボットがあらかじめ計画された経路を移動する場合や、自動掃除機のようにロボットがその場で経路を決定しながら移動する場合でも、ロボットがこれから先の状態や予定経路を予告

表示して一定時間後に実際にそのとおりに移動するだけなので、作業の遂行という観点では問題がない。しかし乗用車のように、人がロボットを実時間で直接操作する場合には、予告表示から一定時間後に動作すると、制御系に常に一定の時間遅れが挿入されることになり、操作者にとって操作性が悪くなるという問題点がある。そこでこのような場合には、これまでの操作者の操作履歴や環境条件などから操作者の次の操作を予測し、ロボットは予測した動作を予告表示しながら、操作者からの指令を実時間で実行してゆく方法が考えられる。この操作者の次の操作を予測する方法とともに、操作者が予測に反した操作をした場合やロボットが安全を確保するために自律的に急停止する場合などへの対処方法も、今後の課題である。

#### [成果の発表，論文など]

##### ◇著書

- 11) T. Matsumaru: Preliminary-Announcement Function of Mobile Robots' Upcoming Operation, in *Robotics Research Trends*, Nova Science Publishers, (2007.12). (in press)

##### ◇学術誌論文

- 21) 松丸隆文，工藤新之介，遠藤久嗣，伊藤友孝：人間共存型移動ロボットの行動を予告表示する方法と有効性のシミュレーションによる検討，計測自動制御学会論文集，vol.40，no.2，pp.189-198，(2004.02).  
 22) T. Matsumaru, K. Iwase, K. Akiyama, T. Kusada, and T. Ito: Mobile robot with eyeball expression as the preliminary-announcement and display of the robot's following motion, *Autonomous Robots*, vol.18, no.2, pp.231-246, (2005.03).  
 23) 松丸隆文，草田享，岩瀬和也：光線を用いて予定経路を表示する機能をもつ移動ロボットの開発，日本ロボット学会誌，vol.24，no.8，pp.976-984，(2006.11).  
 24) 松丸隆文，干場祐，平岩慎司，宮田康広：プロジェクタを用いて次の動作を予告表示する機能をもつ移動ロボットの開発，日本ロボット学会誌，vol.25，no.3，pp.410-421，(2007.04).  
 25) T. Matsumaru: Development of four kinds of mobile robot with preliminary-announcement and display function of its forthcoming operation, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.19, no.2, pp.148-159, (2007.04).

##### ◇国際会議論文

- 31) T. Matsumaru, and Y. Terasawa: Preliminary Announcement and Display for Human-Friendly

- Mobile Robot, Preprints of IFAC Workshop on Mobile Robot Technology, [Jejudo, Korea], pp.226-231, (2001.05.).
- 32) T. Matsumaru, and K. Hagiwara: Method and Effect of Preliminary-Announcement and Display for Translation of Mobile Robot, Proc. of the 10th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2001), [Budapest, Hungary], 17-4, pp.573-578, (2001.08).
- 33) T. Matsumaru, and K. Hagiwara: Preliminary-Announcement and Display for Translation and Rotation of Human-Friendly Mobile Robot, Proc. of 10th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN 2001), [Bordeaux and Paris, France], WE11, pp.213-218, (2001.09).
- 34) T. Matsumaru, K. Iwase, T. Kusada, Kyouhei Akiyama, Hirotooshi Gomi, and Tomotaka Ito: Preliminary-Announcement Function of Mobile Robot's Following Motion by using Omni-directional Display, Proc. of The 11th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2003), [Coimbra, Portugal], pp.650-657, (2003.07).
- 35) T. Matsumaru, K. Akiyama, K. Iwase, T. Kusada, H. Gomi, and T. Ito: Eyeball Expression for Preliminary-Announcement of Mobile Robot's Following Motion, Proc. of The 11th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2003), [Coimbra, Portugal], pp.797-803, (2003.07).
- 36) T. Matsumaru, H. Endo, and T. Ito: Examination by Software Simulation on Preliminary-Announcement and Display of Mobile Robot's Following Action by Lamp or Blowouts, 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2003 IEEE ICRA), [Taipei, Taiwan], TuA12-4, pp.362-367, (2003.09).
- 37) T. Matsumaru: Mobile Robot with Preliminary-announcement and Display Function of Following Motion using Projection Equipment, The 15th IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 06), [Hatfield, United Kingdom], ThC2(4), pp.443-450, (2006.09).
- 38) T. Matsumaru, T. Kusada, and K. Iwase: Mobile Robot with Preliminary-Announcement Function of Following Motion using Light-ray, The 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), [Beijing, China], WP2-2(2), pp.1516-1523, (2006.10).
- 39) T. Matsumaru: Mobile Robot with Preliminary-announcement and Indication Function of Forthcoming Operation using Flat-panel Display, 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'07), [Rome, Italy], ThA4.4, pp.1774-1781, (2007.04).
- ◇学術講演会予稿
- 41) 干場祐, 岩瀬和也, 松丸隆文, 伊藤友孝: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第25報)-プロジェクトを利用した移動ロボットの次の行動予告-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2005, 1A1-S-050, (2005.06).
- 42) 干場祐, 宮田康広, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第27報)-プロジェクトによる移動ロボットの次の動作の予告-, 第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1H23, (2005.09).
- 43) 干場祐, 平岩慎司, 宮田康広, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第29報)-プロジェクトを用いた移動ロボットの次の行動の予告表示-, 計測自動制御学会第6回システム・インテグレーション部門講演会(SI2005), 2C1-2, pp.527-528, (2005.12).
- 44) 平岩慎司, 干場祐, 宮田康広, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第30報)-レーザーポインタを用いた移動ロボットの次の行動の予告表示-, 計測自動制御学会第6回システム・インテグレーション部門講演会(SI2005), 2C1-3, pp.529-560, (2005.12).
- 45) 松丸隆文, 干場祐, 宮田康広, 平岩慎司: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第31報)-全方向ディスプレイを用いた動作予告機能付き移動ロボットの開発と評価-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2006(Robomec2006), 2P1-A31, (2006.05).
- 46) 松丸隆文, 干場祐, 宮田康広, 平岩慎司: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第32報)-平面ディスプレイを用いた動作予告機能付き移動ロボットの開発と評価-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2006(Robomec2006), 2P1-A33, (2006.05).
- 47) 松丸隆文, 干場祐, 宮田康広, 平岩慎司: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第33報)-レーザーポインタを用いた動作予告機能付き移動ロボットの開発と評価-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2006(Robomec2006), 2P1-A35, (2006.05).
- 48) 松丸隆文, 干場祐, 宮田康広, 平岩慎司: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第34報)-プロジェクトを用いた動作予告機能付き移動ロボットの開発と評価-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2006(Robomec2006), 2P1-A37, (2006.05).
- 49) 宮田康広, 新林文明, 赤井孝輔, 本多正剛, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第36報)-次の動作の予告表示機能の対人実験-, 計測自動制御学会第7回システム・インテグレーション部門講演会(SI2006), 1F4-6, pp.252-253, (2006.12).
- 4a) 新林文明, 宮田康広, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第37報)-動作の予告表示のための全方向ディスプレイの表示コンテンツの検討-, 2006年度計測自動制御学会中部支部静岡地区計測制御講演会(SICE-Chubu Shizuoka 2006), 2A4, (2006.12).
- 4b) 宮田康広, 新林文明, 赤井孝輔, 本多正剛, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第38報)-次の動作の予告表示の対人実験-, 2006年度計測自動制御学会中部支部静岡地区計測制御講演会(SICE-Chubu Shizuoka 2006), 2A5, (2006.12).
- 4c) 宮田康広, 新林文明, 鈴木重央, 林民通, 赤井孝輔, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの動作予告に関する研究(第1報)-4種類の方法の対人評価実験-, 第51回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'07), 5T2-1, pp.159-160, (2007.05).
- 4d) 新林文明, 宮田康広, 鈴木重央, 林民通, 赤井孝輔, 松丸隆文: 人間共存型ロボットの動作予告に関する研究(第2報)-全方向ディスプレイの表示内容の検討-, 第51回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'07), 5T2-2, pp.161-162, (2007.05).