

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号： 19500156
 研究課題名（和文） 遠隔地におけるロボットの操作および動作の安全性向上に関する研究
 研究課題名（英文） Research on safety improvement for robot operation and movement
 at remote location
 研究代表者
 富永 将史（TOMINAGA, Masafumi）
 早稲田大学・総合研究機構・講師
 研究者番号：80409747

研究成果の概要：ロボットの活動の安全性向上を目指している。全方位カメラを用い、映像の伝送タイムラグに対して、仮想的に画像を補間することで遠隔地からの操縦性の向上を図った。レーザ式測域センサを併用し、距離に応じた補完や路面状態の視覚的な提示を行うことで、より違和感の少ない操縦インタフェースを構築した。更に、RFID タグや環境の 3 次元図面データを用い、周囲環境の把握・自己位置推定精度の向上を行うことで、安全性の向上が可能になった。

交付額

（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	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センサ融合・統合，画像情報処理，コンピュータビジョン，行動環境認識，自律システム

1. 研究開始当初の背景

ロボット産業界が活発となり、愛・地球博（2005 年日本国際博覧会）などの展示会によりロボットがより人に身近なものとなってきた現状に対し、屋外で活発的に行動するロボットの開発はまだ遅れている。その一端には、法的整備はもちろん、ロボット自身が人間と接触するのは危険であるとの認識が第一にある。様々なロボットの研究・開発がなされている中、ロボットが動作している環境に対しての安全性の議論はあまりされ

ていない。

現在の社会において、人間に対して現状ロボットの能力があまりにも劣るため、ロボットの生活における利用はあまり進んでいない。完全な自律活動を伴い人間の役に立つロボットが普及するためには、まだまだ多くの課題がある。また、そのようなロボットが今すぐに完成し一般の場に導入できたとしても、身近に接するようなロボットに対して法的にも精神的にも未成熟な社会において簡単には受け入れられないと思われる。そこで、

ロボットの最終進化系を直ぐに提示するのではなく、段階的に進化するロボットを人々に提示していくことにより、社会がロボットを受け入れやすい土壌を構築することができる。

2. 研究の目的

一般的にロボットの自律行動および操縦支援技術としてはRFIDや赤外線センサ、触覚センサや加速度センサなど、物理的なセンサを利用した研究が主になされている。そのような技術においては、ロボットの周囲環境の現状理解が主であり、未来の環境や状態の予測による安全性の確保は行われていない。人間の行動では、経験的な情報から未来の予測し危険を回避していると考えられる。車の運転などにおいても、わき道や遮蔽物などからの飛び出しを予測した上で操縦している。このような危険予測や危険箇所の注視を遠隔地でのロボットの制御に取り入れることで、ロボットの周囲に対する安全性を向上することができる。

本研究では、視覚センサを主に用い、人間の行動予測と同様、映像情報からの未来予測などを行うことで、周囲の環境に対し、より安全性の高いロボット技術の研究を行う。主に、遠隔地から人間による操縦性を向上したインタフェースの確立および、他のセンサとの協調により周囲環境を把握・予測し、自律行動を助けるシステムの確立を行う。

3. 研究の方法

異なる種類のセンサ（視覚センサや距離センサなど）の協調により、ロボットの安全性を高める研究(1)~(3)を行う。なお、各センサは図1に示す研究用ロボットに導入し研究を進めると共に、既に環境に整備されているRFIDタグや定点カメラなども活用する。



図1 研究用ベースロボット

(1) 遠隔操縦インタフェースの設計と構築

遠隔操縦ロボットは、搭載されているカメラの映像を伝送し、操縦者が映像を視認することで制御される。この際、距離や伝送帯域幅、ノイズなどの影響により画像の伝送遅延やタイムラグが発生する。そのため、操縦者は既に届いている過去の地点の映像でのみ制御を求められ、適切な操縦ができず、スム

ーズで安全な制御が困難となる。

全方位カメラを搭載することでロボットの周り360度を撮像し、そのうちロボットの前(120度)、左側(60度)、右側(60度)を操縦者に提示するシステムを構築する。本システムにおいて、タイムラグが発生している間の提示画像は、ロボットの移動速度から画像に拡大・縮小・回転を施すことで予測画像として生成する。しかしながらロボットの前進移動に対し周囲環境の変化は単純な拡大・縮小ではない。図2に示すように正面および後方は変化量が少なく、側面(真横)が最も変化量が大きくなる。またこれはロボットからの距離にも影響される。そのため、レーザ測域センサを併用し距離計測を行い、距離に応じた予測を行うことで、人の感性に適した操縦インタフェースを構築する。

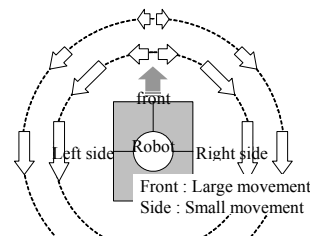


図2 移動方向と周囲環境の移動量

(2) 周辺環境の認識システムの開発

既知の地形情報と動物体の存在情報、そのどちらかが欠けたとしても安全な自律移動は実現できない。両情報を得ることでようやくロボットは安全な経路を通り、更に障害物を回避しながら目的地にたどり着くことが可能となる。新たな視覚センサを導入することで、周囲環境に存在する物体までの距離や形状などを得ることで安全な自律走行システムを目指す。人の目の認識に近い方法を取り入れることで周囲の環境を認識する。

環境情報の一つとして、ロボットは床面に設置したRFIDタグなどにより自己位置を推定する。この精度は、タグの間隔に依存し正確な値ではない。人が周囲を見渡して自己位置を認識するように、実際の位置で撮影するロボットの視点画像に対して、RFIDタグの位置情報から環境の3次元図面データを用いて近傍位置の仮想画像を生成し、比較することで、検出位置の精度向上を目指す。

更に、環境に整備した複数のカメラを協調し、ロボットの周囲領域に視体積交差法による高い分解能のボクセル空間を仮想的に構築し、近接範囲に存在する物体を検出する。

このように既存の環境に整備されているカメラやRFIDタグを併用することで、目的地までの適切な移動経路のプランニングや、安全な移動を行うことのできるシステムの構築を目指す。

(3) ロボットと操縦者の情報共有

ロボットにおいてその周囲環境はリアルタイムに計測、認識される。対して遠隔操縦の場合、伝送遅延により過去の情報しか得ることができない。そのためロボットにおいて安全に移動するためのより重要な情報を選別し、操縦者と共有する手法を開発する。

共有すべき重要な情報として、路面の状態が重要な要素の一つであると考えられる。車輪が直に接地する路面箇所の情報を取得し利用することで、操縦者へ効率良く路面状態を提示し、安全性の向上が期待できる。コンセプトを図3に示す。距離センサはロボットの左右に横向きに設置し、走行路面の車輪（もしくはクローラなど）の通過線上を計測する。加えて視覚センサを距離センサの中間に配置し、距離計測を行った位置との対応を視覚的に判断することで、重要な情報を選別可能とする。

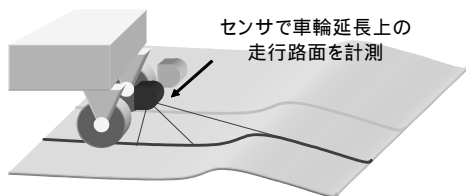


図3 路面情報の取得コンセプト

4. 研究成果

(1) 遠隔操縦インタフェースの設計と構築

全方位カメラを用いて周囲360度を撮影し、ロボットの前方視野を操縦者へ提示するシステムを構築した。本システムではロボットの移動速度と操縦者の制御から状態を推定し、既に操縦者のもとに届いている過去画像に拡大・縮小・回転を施すことで、仮想的に現在の位置の予測画像を生成することで、操縦性の向上を図った。

図4に前進時の、図5に左右旋回時のロボットの位置および視野の角度関係を示す。

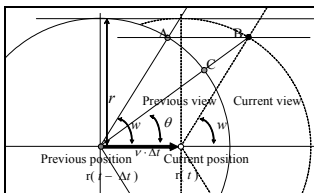


図4 前進時の角度関係

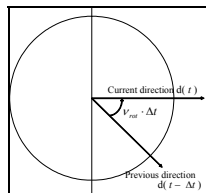


図5 旋回時角度

ロボットの前進速度 v m/sec、過去画像の受信から現在までの経過時間を t とする。現在の視野角 $2 \cdot w$ degree とすると、距離 r での左視野端は、現在位置では座標 B が、過去位置では座標 A が観測できる（図4）。従って、過去位置で座標 C の方向が、現在の画像端として確認できることとなる。現在視野

$2 \cdot w$ に対応する視野 $2 \cdot \theta$ は、

$$\theta = \arctan\left(\frac{r \cdot \sin w}{r \cdot \cos w + v \cdot \Delta t}\right) \quad (1)$$

から求められる。この対応する視野の過去画像を線形拡大することで現在の推定画像を得ることが可能となる。また、旋回速度 v_{rot} m/sec とすると、図5に示すように、既に画像が受信された際の方向 $d(t - t)$ から、現在の方向 $d(t)$ を

$$\omega = v_{rot} \cdot \Delta t \quad (2)$$

旋回したと推定し、視野の中心軸を ω degrees 横方向に移動することで現在の推定画像を生成する。このとき全方位カメラを利用するため、破綻の生じない生成ができる。

ロボットの移動に対して周囲環境の変化は単純な拡大・縮小ではない（図2）。視覚センサに加えレーザ式測域センサを併用し距離計測を行い、距離に応じた詳細な変化に対応した未来予測を行うことで、より違和感の少ない操縦インタフェースを構築した。

取得済みの過去画像と、操縦者への提示画像の関係として、その位置的關係を図6に示す。現在位置から距離 r の地点に視認することのできる座標 A は、中心からの角度 ξ に対して、過去位置では角度 ψ の位置に視認できる。操縦者に提示すべき現在位置の画像は、

$$\psi = \arctan\left(\frac{r \cdot \sin \xi}{r \cdot \cos \xi + v \cdot \Delta t}\right) \quad (3)$$

により座標値の角度計算を行い、変換することが可能。例えば、計測距離 $r = 100$ cm とすると、操縦者へ提示する画像で角度 $= 60$ cm の位置は、過去画像では角度 $\psi = 40$ cm の位置に対応する。

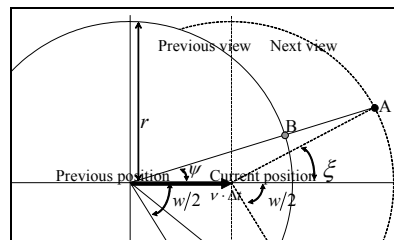


図6 現在と過去の位置における視野の関係

図7に遠隔操縦ロボット搭載の全方位カメラ（高さ1600mm）からの画像を示す。また、同時刻に計測した距離を図8に示す。図中円弧の中心がロボットの中心・全方位カメラの中心となる。ロボット右側面の建物の壁までの距離約750mmや、左側面の垣根までの距離約1900mm～3500mmが計測できている。なお、最大計測距離4000mm以上の箇所が計測不可のため値の無い0mmとなっている。

図9に構築したシステムの提示画像（視野角270度：前方120度、左60度、右60度）

を示す。なお、この提示画像はタイムラグが無い時点の変形の無い初期フレームである。図 10 にタイムラグが発生し、後に画像が伝送されるまでの間の補間フレームにおける生成画像を示す。図 10(a)は線形拡大、図 10(b)は距離に適応した変換を施したものである。図 10(b)に示すようにロボットの近距離に存在する壁は、経過時間に応じて中心から離れるような変換が行われる。近距離の物体が、奥の景色よりも早く後方に流れるように感じる、より人の感性に近い遠隔操縦インターフェースが構築できた。

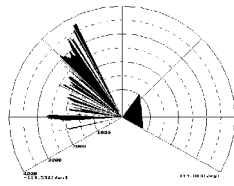
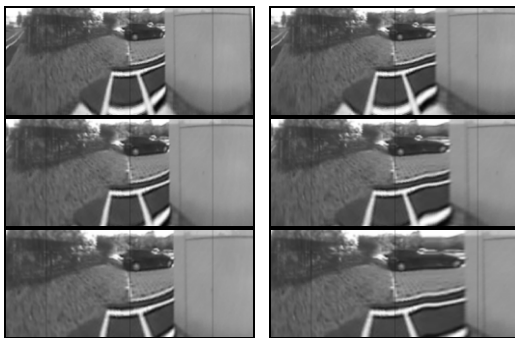


図 7 全方位カメラ映像 図 8 計測距離



図 9 提示画像 (パノラマ画像視野角 270 度)



(a) 線形拡大変換 (b) 距離適応変換

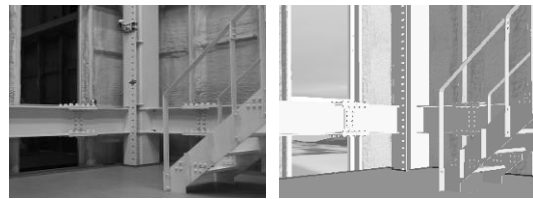
図 10 補間画像：遠隔操縦インターフェース

(2) 周辺環境の認識システムの開発

ロボットの位置及び周辺環境の検出精度を高めるための実験を行った。

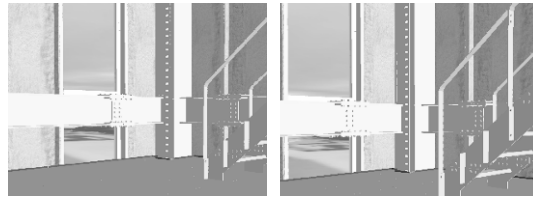
図 11(a)にロボット視点の画像を、図 11(b)に同位置における仮想画像を示す。実験では、この正確な位置での仮想画像と実画像の相関値と、その近傍位置で生成できる仮想画像と実画像の相関を比較し、位置検出の精度向上の可能性を示した。図 12(a)、(b)に異なる近傍位置で生成した仮想画像を示す。なお、相関値を求める際の特徴は、Prewitt フィルタにより水平・垂直・右上がり・右下がりの

4 方向のエッジに分離し、低解像度にしたものを使用した。なお、解像度は実位置画像図 11 における最適サイズ 20×15 とした。



(a) 実画像 (b) 実位置の仮想画像

図 11 実位置



(a) 仮想画像 (b) 仮想画像

図 12 近傍位置

実画像-図 11(a)に対する図 12(a)の相関値は 0.3097、図 12(b)の相関値は 0.0265 となり、実際に実位置により近い仮想地点図 12(b)の仮想画像の相関値が低いことが確認できた。従って、RFID タグによる検出位置を基準に、近傍地点の仮想画像を比較することで、検出精度を向上することが期待できる。

検出した位置を元にロボットの周囲に限定し視体積交差法による周囲環境の検出を行った。図 13 に環境に整備したカメラからの画像を、図 14 にボクセル空間(サイズ $100 \times 100 \times 66$: 分解能 3cm)への投票結果を示す。図中ロボットを中心とした円形の濃淡は存在確立の分布を示す。結果、ロボットと共に、近接範囲の物体(壁との間の人間)を高分解能で検出し、その存在を認識することができた。



図 13 環境整備カメラからの画像

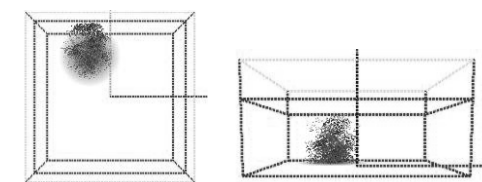


図 14 ロボット近接範囲の物体検出結果

(3) ロボットと操縦者の情報共有

ロボットの走行路面情報を計測し、操縦者と情報共有を行うシステムを構築した。構築した計測ユニットを図 15 に、カメラから撮影した画像における座標と、距離センサ (URG-04LX) により計測した位置の関係を図 16 に示す。z 軸方向がロボット前方である。カメラと URG 間の距離は横 (y 軸) 方向 $D = 11.0$ cm、前後 (x 軸) 方向 $R = 9.0$ cm とした。URG において、1 回のラインスキャン中 i 番目に得られた計測データのなす角を θ_i 、得られた距離 ds_i とする。対するカメラの画像 $f(i, j)$ は、画角 $H \times V$ 度、解像度 $Width \times Height$ 画素、光軸 画像中心 (hi, hj) とすると、

$$f(i, j) = \left(\frac{\omega_x \times Width}{H} + hi, \frac{\omega_y \times Height}{V} + hj \right) \quad (4)$$

$$dz_i = ds_i \cdot \cos \theta_i, \quad dy_i = ds_i \cdot \sin \theta_i \quad (5)$$

$$\omega_x = \tan^{-1} \left(\frac{D}{dz_i - R} \right), \quad \omega_y = \tan^{-1} \left(\frac{dy_i}{dz_i - R} \right) \quad (6)$$

として対応関係を求めることができる。



図 15 視覚・距離計測ユニット

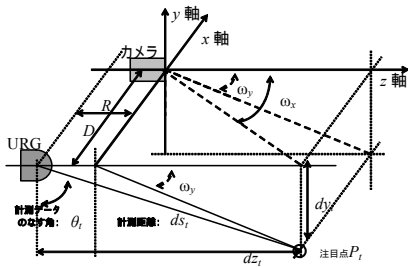


図 16 カメラと距離センサの関係

計測した距離データ・画像データを元に路面の状態を推定した。

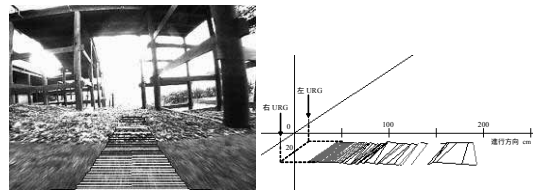
局所的な特徴である凸凹度 $P1$ は、注目点 P_i の前後 (z 軸) 方向の局所範囲 (\pm cm) 内に含まれるデータから、高低値である式(4)の最大と最小から

$$P1 = \frac{1}{M1} \left(\frac{(\text{MAX}dy_{i_L} - \text{MIN}dy_{i_L}) + (\text{MAX}dy_{i_R} - \text{MIN}dy_{i_R})}{2} \right) \quad (7)$$

として求める。ここで $_L$ は左側、 $_R$ は右側の URL を示す。M1 は凸凹に対するロボットの走行可能限界である。局所範囲 および、

走行可能限界 $M1$ はロボットの形状及び駆動系 (車輪) のサイズより決定する。

図 17 に路面がアスファルトから砂利へ変わる場面の、凸凹度の提示結果を示す。実験の際の走行可能限界は $M1 = 6.0$ cm とした。図 17(a) は画像に推定した凸凹度を対応位置に提示したものである。図中水平のラインは 2 台の距離センサの対応を示し、凸凹度 0.20 (約 1.2cm) 未満を白線で、以上を黒線で示す。アスファルト部分の平均凸凹度 $P1$ は 0.15 程度、砂利部分は 0.29 程度である。図 17(b) は、距離データのグラフである。2 台の距離センサの中心が原点であり、横軸はロボットの進行方向、縦軸はロボットにとっての上下方向である。約 80cm 先からの砂利の凸凹が確認できた。



(a) 提示画像 (b) 距離データ

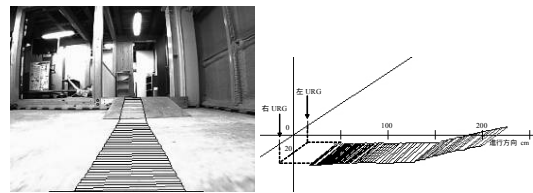
図 17 凸凹度の提示 (アスファルト・砂利)

大域的な特徴である傾斜度 $P2$ は、前後 (z 軸) 方向の広範囲 (\pm cm) にて、含まれる N 個のデータから、2 点の組み合わせにより傾きを総当りで計算し、この平均値をもって傾斜角が導かれることから、

$$P2 = \frac{1}{M2} \left(\frac{1}{2 \cdot N} \sum_m \sum_n \frac{dy_{m_LR} - dy_{n_LR}}{dx_{m_LR} - dx_{n_LR}} \right) \quad (8)$$

として求める。ここで、 $_LR$ は左右 URG の平均値、 $M2$ は登坂可能限界であり、 $M2$ は走行可能限界と同様にロボットの形状及び駆動系 (車輪) のサイズより決定する。

図 18 に前方に斜面がある場面の傾斜度の提示結果を示す。登坂可能限界は $M2 = 0.5$ (45 度) とした。図中、白線部分は傾斜度 -0.334 以下 (約 15 度以上) を示す。約 150cm の地点より坂が存在することが確認できた。なお、平坦部分の平均傾斜度 $P2$ は -0.01 程度、坂部分は -0.52 程度 (約 23.4 度) であった。



(a) 提示画像 (b) 距離データ

図 18 傾斜度の提示 (屋内スロープ)

路面の種別情報も重要な共有要素の一つ

である。建物の床やアスファルト等の人工物と、土壌や芝生等の自然物の分離を目指し、本研究では色相を利用することとした。

式(4)~(6)により、注目データ ds_i と画像上の画素 $f(i, j)$ の対応を取ることができ、ロボットがそのまま直進した際に、車輪が直に接地する箇所の路面が、走行の容易な人工物であるか、困難な自然物であるかをテクスチャから判断することが可能となる。人工物寄与度は、対応する画素の近傍領域 (5×5) に限定してHSV変換を行い、その近傍領域内の色相値 H_i の平均

$$P3 = \frac{1}{5 \times 5} \cdot \sum_{k=i-2}^{i+2} \sum_{l=j-2}^{j+2} (H_i(k, l)) \quad (9)$$

として求める。なお、 $P3$ は赤を 1.66 とする 0.0~1.0 の値として正規化する。ここで、土壌とアスファルトを主に区別する目的から、暖色系を自然物、寒色系を人工物と定義し、人工物寄与度 $P3$ が低いほど自然物・高いほど人工物として判別する。

図 19 にアスファルト及び芝生のある場面での人工物寄与度提示結果を示す。濃淡が $P3$ の程度を示し、黒ほど人工物寄与度が低く自然物である可能性を示し、白いほど高く人工物である可能性を示す。芝生領域の平均人工物寄与度 $P3$ は 0.29、アスファルト領域は 0.72 であった。一様な明るさであれば有効と考えられるが、実際には日光の影響などを受けるため、人工物寄与度と人工物・自然物の対応やその他の種別を学習などから判別する必要があると考えられる。

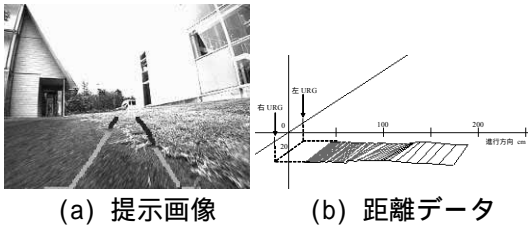


図 19 人工物寄与度 (アスファルト・芝生)

(5) まとめ

遠隔操縦ロボットにおける画像の伝送遅延・タイムラグ問題において、ロボットに搭載した視覚センサ (全方位カメラ) と距離センサ (レーザ式測域センサ) を融合することで、画像がオペレータへ届いていない間の画像を補間し、(過去画像からの) 未来予測画像を生成し、オペレータに提示する新しいシステムの構築を行った。仮想的に現在位置の画像をオペレータに提示することで、操縦性高まり、適切な位置での停止や旋回が可能となったため、副次的に安全性の向上が期待できる。

また、環境に整備したセンサと協調し、自

己位置や周囲環境の検出精度を高めるとともに、遠隔操縦ロボットの安全な活動を目指し、視覚センサと距離センサを用いた路面状態の情報提示システムを構築した。距離センサからの凸凹度、傾斜度および、距離・視覚センサからの人工物寄与度を定義・情報提示し、有効性の一部を示した。今回の実験では、情報の整理のため処理及び提示を個別に行ったが、今後同時に情報提示するシステムを構築する必要がある。更に、路面状態の判別を学習データから推定し、ロボットのタイプに合わせた走行容易度を提示することで、より安全な活動を可能としていく。

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)

[学会発表](計4件)

富永将史、遠隔操縦ロボットのための視覚・距離センサを用いた路面状態の提示、動的画像処理実利用化ワークショップDIA2009、2009/03/05、福島県郡山市

富永将史、視覚・距離センサの融合による遠隔操縦ロボットの安全性の向上、動的画像処理実利用化ワークショップDIA2008、2008/03/07、愛知県豊田市

富永将史、外部カメラからのロボットの周囲環境の検出、ビジョン技術の実利用ワークショップViEW2007、2007/12/07、神奈川県横浜市

大田紘高、実画像と仮想画像による建物内のロボット位置検出、ビジョン技術の実利用ワークショップViEW2007、2007/12/06、神奈川県横浜市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富永 将史 (TOMINAGA MASAFUMI)

早稲田大学・総合研究機構・講師

研究者番号: 80409747

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

橋本 周司 (HASHIMOTO SHUJI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 60063806

大田 紘高 (OHTA HIROTAKA)

早稲田大学・総合研究機構・助手

研究者番号: 90409748