

# 俯瞰カメラと移動ロボットを用いた フィードバック制御系の可視化の試みと評価

疋田真一<sup>†</sup> 兼宗進<sup>†</sup>

**概要**：計測制御の教育分野では、フィードバック制御系の設計に関する教育が行われており、これらの直感的な理解と主体的な学びを支援する教材が求められている。そこで、本研究では、学びの手がかりが目に見える教材として、俯瞰カメラを用いて移動ロボットを目標位置に誘導する計測制御システムを開発した。提案教材では、ロボットの位置や方向、目標位置に対する距離偏差や角度偏差、ロボットを駆動するモータへの入力を俯瞰カメラ画像に重畳表示することによって、偏差に応じたロボットの動きの変化が目で見えてわかるようになっている。大学の実験科目に提案教材を導入し、4件法（評価値1-4、数字が大きいほど肯定的評価）によるアンケート調査を行ったところ、制御に対する理解と興味、可視化の効果、実験の面白さに関する5つの設問すべてにおいて、73名の回答者の84%以上が肯定的（評価値3以上）であった。

## Evaluation of Visualization of Signals in a Feedback Control System Using a Bird's Eye View Camera and a Mobile Robot

SHINICHI HIKITA<sup>†</sup> SUSUMU KANEMUNE<sup>†</sup>

**Abstract**: We have developed a positioning control system for a mobile robot using a bird's eye view camera to support education on measurement and control. The angle and distance deviation and the manipulated variables to drive the robot calculated from the controller are superimposed on the camera image to visualize a feedback system. The proposed system was introduced in the undergraduate laboratory course to evaluate the effectiveness with four point grading scale (4: very positive, 3: positive, 2: negative, 1: very negative). Number of students who answered 3 or 4 for all the five questions about understanding, motivation and effect of visualization was more than 84% of 73 students. This result shows that the proposed system is effective for measurement and control education.

### 1. はじめに

計測制御の教育分野では、中学生や初学者向けに、フローチャートを用いた初歩的な制御に加え、クラス設計や状態遷移図などを用いた工夫が行われてきた[1]-[3]。一方、企業では、製品開発の現場でPID等の制御理論を活用しており、制御系の設計にはブロック線図などのわかりやすく図示する記法が用いられている。大学においても、制御理論の基礎として制御対象のモデリングとフィードバック制御系の設計に関する教育が行われており、これらの直感的な理解と主体的な学びを支援する教材が求められている。そこで、本研究では、学びの手がかりが目に見える計測制御教材を提案する。提案教材は、移動ロボットに取り付けたマーカの位置と方向を俯瞰カメラで計測し、ロボットを目標位置に誘導するシステムで、カメラ画像にフィードバック制御における「目標値」「偏差」「操作量」及び「制御量」を重畳して表示することでフィードバック制御系の構成要素と信号が目で見えて理解できるようになっている。

本稿では、提案する移動ロボットの位置制御システムについて説明し、提案教材を大学の実験科目に導入して有効性を評価した結果を報告する。

### 2. 提案教材

#### 2.1 教材開発のコンセプト

近年、家電製品から自動車・ロケットに至る製品開発の現場では、MATLAB/Simulink[4]などを利用したモデルベース開発の導入が進んでおり、システム全体をブロック線図的に理解する能力が重要となっている。そこで、将来的には計測制御の学習を支援する初学者向け教材においても、最終的にブロック線図的な考え方に到達できるものが望ましいと考えられる。

次に、計測に着目した中学生対象の実践授業[5]によると、計測と制御が結びついていることを理解している生徒は少ないことが報告されている。移動ロボットの計測に関連して、これまでに対象物までの距離を計測する教材[5]や、移動時間や角度を積算することでロボット自身の位置を推定する教材[6]が提案されてきたが、これらの教材では精度に課題があり、対象物との位置関係を正確に把握することは容易ではなかった。移動ロボットを用いた教材で、ロボットの位置や方向を低コストで正確に計測できれば、生徒の興味を喚起する様々なタスクが可能になるとともに、計測値（制御量）とそれに基づくロボットの動きとの関係をリアルタイムで可視化することによって制御における計測の意味の理解につながると期待される。

<sup>†</sup>大阪電気通信大学  
Osaka Electro-Communication University

以上の点をふまえ、本研究では、教材開発の狙いを大学で学ぶ古典制御理論に基づく制御系設計の基礎を理解することに定め、これを主体的に学習できるように学びの手がかり（目標値、偏差、操作量、制御量）が目に見える教材の開発を試みる。

## 2.2 俯瞰カメラを用いた移動ロボットの位置制御系

先に述べた教材開発のコンセプトに基づき、俯瞰カメラを用いた移動ロボットの位置制御システムを開発した。マーカを取り付けた移動ロボット、目標マーカ、俯瞰カメラ、PC からの位置制御システムの概略図を図 1 に示す。画像処理部では、俯瞰カメラで撮影した画像からロボットマーカの位置と方向、目標マーカの位置を計測し、共有メモリに書き込む。次に、制御部では、各マーカの位置・方向情報に基づきロボットのモータパワー（PWM 信号における duty 比に相当）を決定する。次に、通信部では、無線 LAN を利用して制御部で決定されたモータパワーをロボットに送信する。最後に、可視化部では、制御系における目標値、偏差、操作量、制御量をカメラ画像に重ねて表示する。なお、各プログラムは、Microsoft Visual C++ とオープンソースの画像処理ライブラリである OpenCV [7] 及び ESPLIB [8] を用いて開発された。本システムでは、 $640 \times 480$  [pixel] の画像に対して 30 フレーム/秒の画像処理、制御、通信の処理を 1 台の PC（Windows7, Intel Core i3-4160）で行うことができる。

## 3. カメラを用いたマーカの位置と方向の計測

### 3.1 マーカ位置の検出

蛍光用紙を用いて三角形と円形のマーカを作成し、三角形のマーカを移動ロボットの上部に取り付けた（図 2）。図 3 (a) は、部屋の天井に設置した USB カメラ（ロジクール、HD ウェブカム C270）で撮影した移動ロボットと円形の目標マーカのカラー画像の一部を拡大したものである。このようなカメラ画像を適切な閾値で二値化[9]すると、マーカを含んだ領域は、白色領域として背景（黒色）と区別される（図 3 (b)）。通常、二値画像における各画素  $(x, y)$  の輝度  $f(x, y)$  には 0 と 1 の二値が用いられるが、図 3 (b) では、見やすさのため、背景を輝度値 0（黒色）、1 とすべき領域を輝度値 255（白色）で表示している。なお、画像座標系では、画像左上を原点  $(0, 0)$  とし、 $x$  軸を右向きに、 $y$  軸を下向きにとる。次に、各白色領域に番号を付け（ラベリング処理[9]）、各領域の平均色と面積の閾値を用いて移動ロボットと目標マーカの領域を抽出する（図 3 (b) の外接長方形）。抽出された領域の重心座標  $(\bar{x}, \bar{y})$  をもって、マーカの位置とする（(1)式）。図 3 (b) では、検出された各領域の重心位置が赤色の点で表されている。

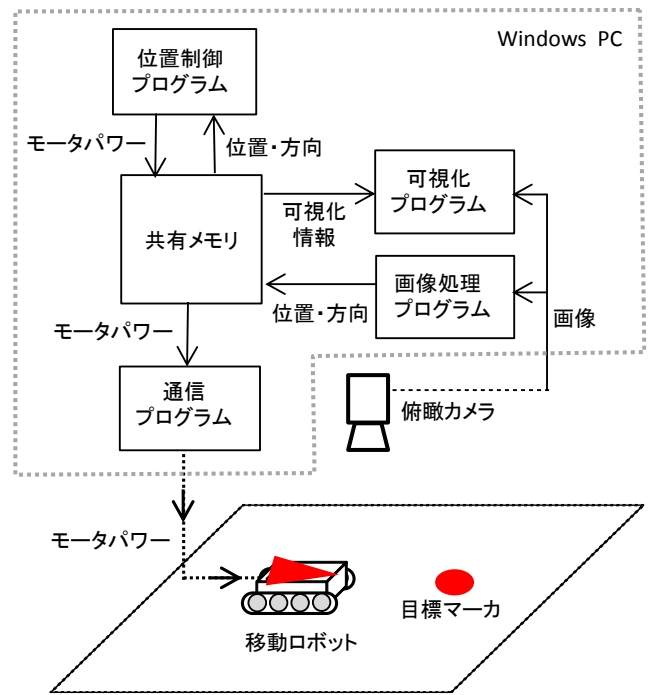


図 1 俯瞰カメラを用いたロボットの位置制御システム  
 Figure 1 A positioning control system for a mobile robot using a bird's eye view camera.

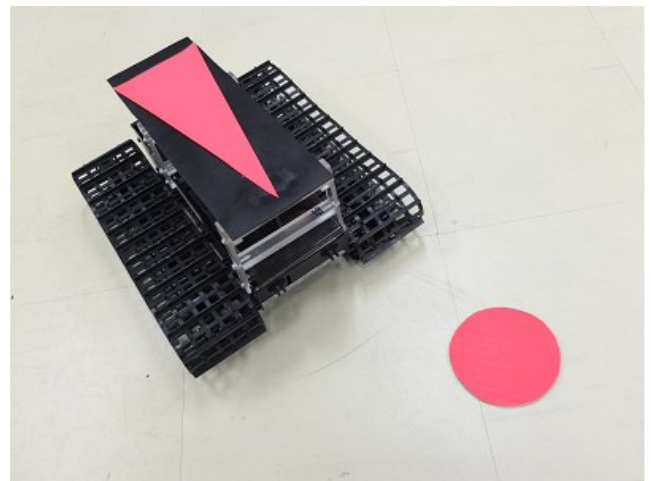


図 2 ロボットマーカ（三角形）と目標マーカ（円形）  
 Figure 2 A triangle marker on a mobile robot and a round shape maker for the target position.

$$\bar{x} = \frac{\sum_x \sum_y x \cdot f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_x \sum_y y \cdot f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)} \quad (1)$$

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if pixel } (x, y) \text{ belongs to the} \\ & \text{corresponding marker region} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

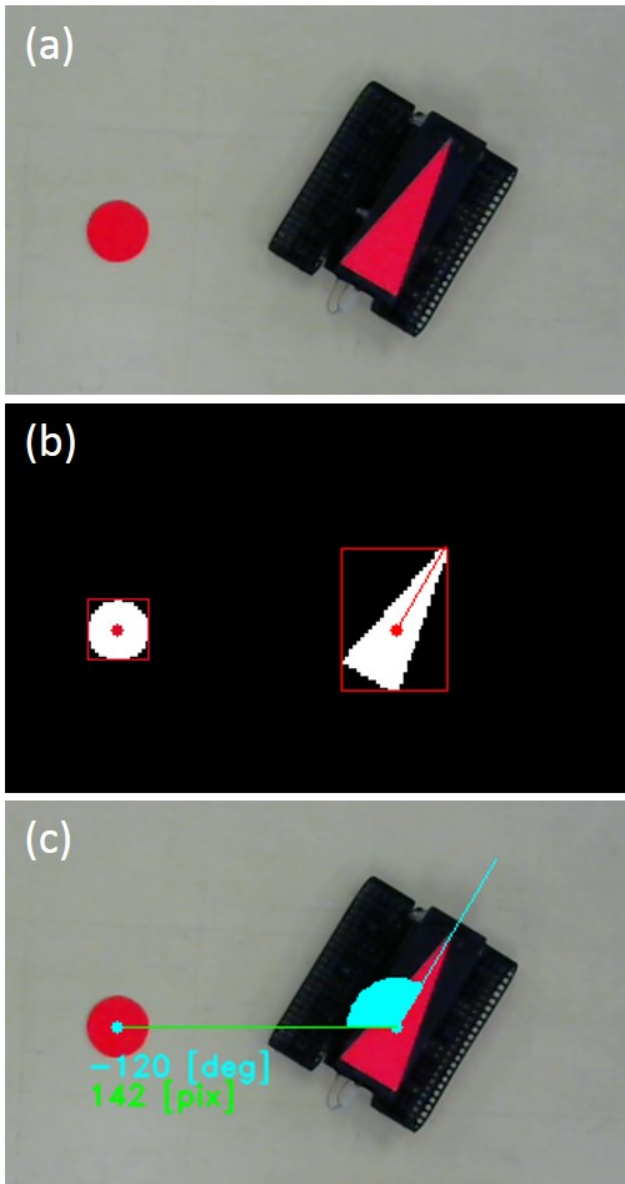


図 3 (a)カメラ画像, (b)マーカー位置と方向の検出, (c)可視化画像

Figure 3 Original camera image (a), detection of the marker position and direction (b) and result of visualization (c).

### 3.2 ロボットマーカーの方向の検出

ロボットのマーカーが鋭角二等辺三角形で、頂角の二等分線がロボットの前後方向と一致しているならば、マーカー領域の慣性主軸を求めることによって、ロボットの方向（図 3 (b)の重心から頂角方向に伸びる赤い線）を決定することができる。

二値画像中のマーカー領域について、領域の重心 $(\bar{x}, \bar{y})$ を原点とする座標系におけるモーメント  $m_{ij}$  は、次式で与えられる。

$$m_{ij} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^i \cdot (y - \bar{y})^j \cdot f(x, y) \quad (2)$$

原点（重心）を通る直線  $y = x \cdot \tan \theta$  を軸とする領域の慣性モーメント  $m_\theta$  は、二次モーメントを用いて、

$$m_\theta = m_{20} \cdot \sin^2 \theta - 2m_{11} \cdot \sin \theta \cos \theta + m_{02} \cdot \cos^2 \theta \quad (3)$$

と表される。  $m_\theta$  が  $\theta = \alpha$  のときに最小になるとすると、直線  $y = x \cdot \tan \alpha$  は、この領域の慣性主軸に一致する。  $m_\theta$  を最小にする  $\alpha$  は、  $dm_\theta/d\theta = 0$  において得られる次の二次方程式の解のうち、  $m_\theta$  を小さくするほうの解となる。

$$\tan^2 \theta + \frac{m_{20} - m_{02}}{m_{11}} \cdot \tan \theta - 1 = 0 \quad (4)$$

これまでに慣性主軸の角度  $\alpha$  が求められたが、まだ、マーカーが  $\alpha$  [rad]の方を向いているのか、  $\alpha \pm \pi$  [rad]の方を向いているのかわからない。そこで、二等辺三角形マーカー上の慣性主軸の前後中点（中心位置）と重心位置が異なることを利用して、マーカーの向き（頂角のある方向）を決定する。新たに  $x$  軸を角度  $\alpha$  だけ回転させた慣性主軸に平行な  $X$  軸を考えると、マーカー領域内の各画素の  $X$  座標は、

$$X = x \cos \alpha + y \sin \alpha \quad (5)$$

となる。したがって、マーカーの慣性軸上の中心位置の  $X$  座標  $X_c$  は、マーカー領域内の全画素に対して(5)式の計算を実行したときの最大値  $X_{max}$  と最小値  $X_{min}$  を用いて次式で表される。

$$X_c = \frac{X_{max} + X_{min}}{2} \quad (6)$$

同様に、重心の  $X$  座標  $\bar{X}$  は、

$$\bar{X} = \bar{x} \cos \alpha + \bar{y} \sin \alpha \quad (7)$$

となるので、  $X_c$  と  $\bar{X}$  の大小関係から、重心から中心に向かう方向としてマーカーの向き  $\varphi$  を求めることができる。

$$\varphi = \begin{cases} \alpha, & X_c > \bar{X} \\ \alpha - \pi, & X_c < \bar{X} \text{ and } \alpha > 0 \\ \alpha + \pi, & X_c < \bar{X} \text{ and } \alpha \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

図 3 (c)は、ロボットマーカーと目標マーカーの位置と方向から計算された距離（緑色の線分と数字）と角度（水色の扇形と数字）をカメラ画像に重ねて表示したものである。

#### 4. フィードバック制御系の構築と可視化

図4は、図1の位置制御システムをブロック線図で表したものである。制御対象は移動ロボットで、操作量はロボットを駆動するモータへのパワーである。ロボットを目標位置に誘導するために、ロボットの方向を目標マーカーの方向に一致させること(回転制御)、及びロボットと目標マーカー間の距離を一定値に近づけること(直進制御)を考える。回転制御では、図4における目標値が目標マーカーの方向、制御量がロボットの方向となる。同様に、直進制御では、目標値がある一定値(目標マーカーの半径とロボットマーカーの重心からロボット先端部までの距離を考慮した定数)、制御量がロボットと目標マーカー間の距離になる。回転制御と直進制御における目標値と制御量はいずれも俯瞰カメラ(センサ)を用いて計測できるので、これらの情報を利用してモータパワーを決定する。

動作の面白さと制御の理解のしやすさを考慮し、制御対象の移動ロボットとして R/C 電動雪上車 (KYOSYO, BLIZZARD SR) を選定し、画像認識のため蛍光用紙で作成した鋭角二等辺三角形のマーカーを電動雪上車の上部に取り付けた。電動雪上車の外観と目標マーカー(円形)を図2に示す。この電動雪上車は、左右のベルトを駆動する2つのモータの回転速度を制御することにより、2輪対向型ロボットと同様の動作ができる。モータパワーの正負をモータの順回転と逆回転にそれぞれ対応させると、左右のモータに同符号で同じ大きさのモータパワーを入力すると直進運動となり、異なる符号で同じ大きさのモータパワーを入力すると回転運動となる。位置制御を行うため、図1の位置制御部に距離偏差 $e_d(t)$ (ロボットと目標間の距離)を用いた直進運動制御のためのPコントローラ(9式)と角度偏差 $e_a(t)$ (ロボットの方向と目標方向の角度差)を用いた回転運動制御のためのPIコントローラ(10式)を実装した。

$$m_d(t) = K_i \cdot e_d(t) \quad (9)$$

$$m_a(t) = K_p \cdot e_a(t) + K_i \cdot \int_0^t e_a(\tau) d\tau \quad (10)$$

ここで、 $m_d(t)$ と $m_a(t)$ はロボットへ入力するモータパワー(操作量)に対応し、ロボットの左右のベルトを駆動するモータへの入力をそれぞれ、 $M_L(t)$ と $M_R(t)$ とすると、

$$M_L(t) = m_d(t) + m_a(t) \quad (11)$$

$$M_R(t) = m_d(t) - m_a(t) \quad (12)$$

の関係がある。上式は、回転制御と直進制御を同時に行う場合のモータパワーを表しており、回転制御のみの場合には $m_d(t) = 0$ 、直進制御のみの場合には $m_a(t) = 0$ である。

次に、可視化により理解の手がかりを提示するために、

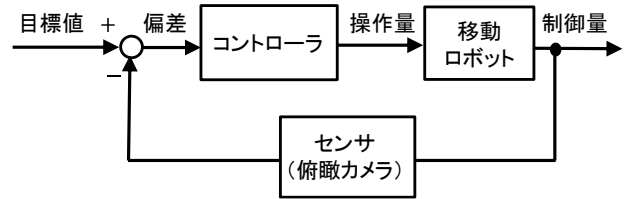


図4 移動ロボットのフィードバック制御系  
 Figure 4 A block diagram of a feedback control system.

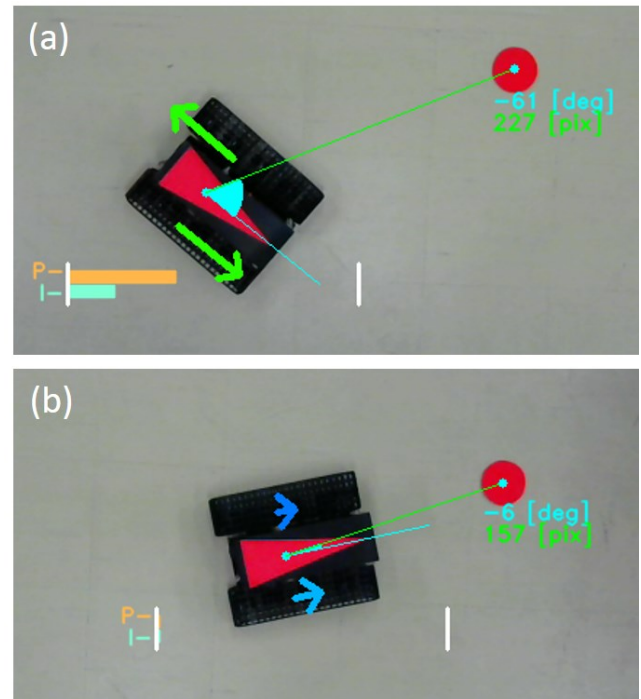


図5 (a)回転制御と(b)直進回転制御時におけるフィードバック制御系の信号の可視化  
 Figure 5 Visualization of signals in a feedback control system during control of rotation (a) and combination of rotation and translation (b).

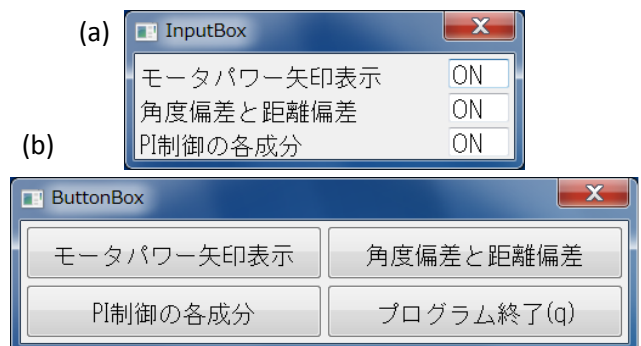


図6 (a)可視化状態ウィンドウと(b)ボタンウィンドウ  
 Figure 6 ON/OFF state of visualization of each signal (a) and button window (b).



俯瞰カメラの画像上にロボットとマーカの距離、角度及びモータパワーを描画する。図5は、角度偏差（水色の扇形と数字で表示、ロボットから見て右方向を正）に基づき移動ロボットが左方向に回転しているとき（図5(a)）、及び角度偏差と距離偏差（緑色の線分と数字で表示）に基づき回転制御と直進制御を同時に行なっているとき（図5(b)）の可視化画像の一部を拡大表示したもので、左右のベルト上の矢印がモータパワー $M_L(t)$ 、 $M_R(t)$ の大きさと方向を表している。矢印の色は、ヒートマップを参考に、モータパワーの大きさ（小から大）に応じて青（小）から赤（大）に変化している。これにより、学習者は角度偏差や距離偏差に応じてロボットへの入力に変化し、ロボットの動きがどう変化するかを目で見て知ることができる。

次に、回転運動中の比例動作と積分動作の働きを直感的に理解できるよう、ロボットの下部に比例動作（P）と積分動作（I）によるモータパワーの大きさを2本のゲージで表示する。P、Iゲージはそれぞれ(10)式の右辺第1項、第2項の絶対値に対応する。正負については、ゲージの見やすさを考慮し、P+、P-のように、文字P、Iの直後に表示する。これにより、一般に理解が難しい積分動作の働きをゲージの伸びとして容易に把握できるようになる。例えば、角度偏差がたいへん小さいとき、P制御によるモータパワーは小さな値で一定となりロボットは静止したままであるが、ロボット静止中でもI制御によるモータパワーは時間とともに増加していき（ゲージが右に伸びていき）、やがてロボットは動き出す。これらの過程をP制御とI制御の2本のゲージを通じて視覚的に知ることができる。

図6(a)は、図1の可視化部におけるカメラ画像表示プログラムの状態表示画面である。カメラ画像に重畳される情報の種類がON/OFFで表示されている。図6(b)の各ボタンをクリックすることで、モータパワーの矢印、角度偏差と距離偏差、及びP動作とI動作の出力の表示をON/OFFできる。また、キーボードの`c`キーを押すことで、表示中の可視化画像（図5）をビットマップ形式で保存することができる。

## 5. 計測制御実験

図1における位置制御部の役割は、移動ロボットへのモータパワーを決定することである。したがって、この制御部のプログラムを目的に応じて複数用意することで、様々な実験課題の実施が可能となる。

図7(a)は、移動ロボットのステップ応答計測用プログラムの数値入力画面である。回転入力の欄にモータパワーの値を指定し、入力時間の欄にモータパワーを入力し続ける時間を指定した後、図7(b)の回転開始のボタンをクリックすると、入力時間の間、回転入力で指定したモータパワーがロボットに送信される。入力時間経過後、モータパワー



図7 ステップ応答計測のための(a)数値入力ウィンドウと(b)ボタンウィンドウ

Figure 7 Numerical input box (a) and button window (b) for a step response measurement.

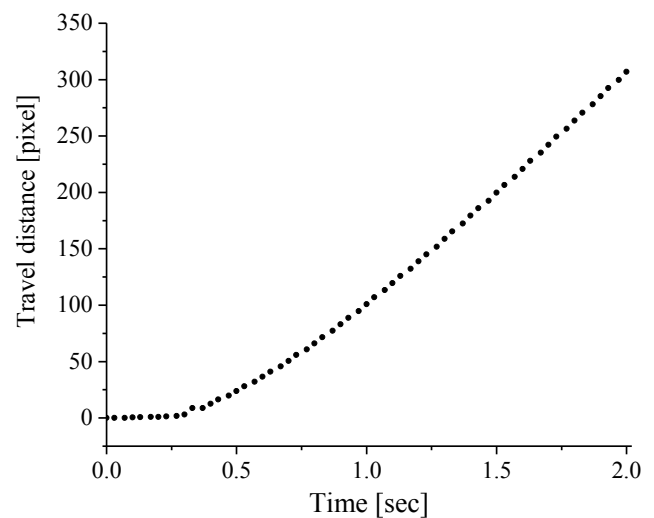


図8 移動ロボット直進時のステップ応答  
 Figure 8 Step response of a mobile robot.

は0となる。計測結果（モータパワー、ロボットの位置及び方向、角度偏差と距離偏差）は、テキストデータ形式で自動的にファイルに保存される。直進入力についても同様である。図8は、移動ロボットの直進運動時のステップ応答 ( $m_a(t) = 50$ ,  $m_d(t) = 0$ ) のグラフである。横軸は時間[s]、縦軸は移動距離[pixel]を表す。ロボットにある一定のモータパワーを与えると、時間遅れをともなって直進を開始し、定常状態ではロボットは一定の速度（傾き）になっていることがわかる。また、このグラフから移動ロボットの動特性（ゲイン、時定数、むだ時間）を読み取り、PIDコントローラ的设计に利用することもできる。

図9(a)は、回転/直進制御用プログラムの数値入力画面である。各ゲインの数値とモータパワー入力時間を指定し、回転または直進制御のボタンをクリックすると制御が開始される。図10は、Pコントローラを用いた回転制御時における移動ロボットの方向（上段）、及び角度偏差とモータパワー（下段）のグラフである。下段のグラフの左の縦軸に



図 9 ロボットの回転制御と直進制御のための(a)数値入力ウィンドウと(b)ボタンウィンドウ

Figure 9 Numerical input box (a) and button window (b) for rotational and translational control.

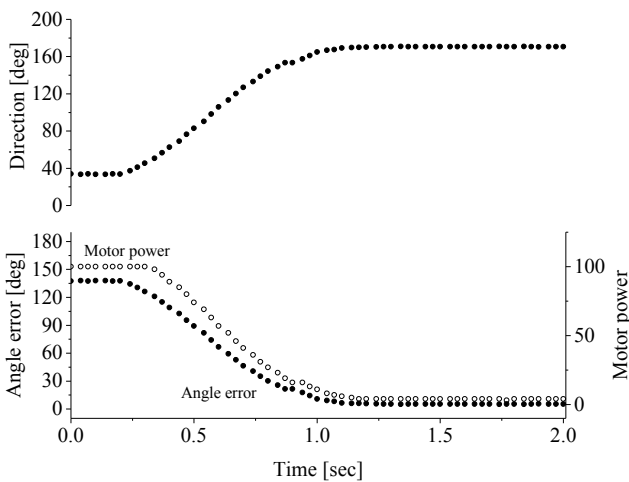


図 10 回転制御における移動ロボットの方向 (上段), 角度偏差とモータパワー (下段) の時間変化

Figure 10 Time course of the direction (upper panel), angle error and motor power (lower panel) during rotational control.

角度偏差 (●の記号に対応), 右の縦軸にモータパワー (○の記号に対応) が示されている。角度の正負については, 画像座標系における  $x$  軸から  $y$  軸に向かう角度を正, 角度偏差はロボットから見て右向きを正としている。図 10 を見ると, ロボットの回転にともなって角度偏差が減少し, それに比例してモータパワーも減少していることがわかる。

ロボットを目標位置に到達させるために, ①方向転換してできるだけ正確に目標の向きに回転させる, ②目標位置に向かって移動し, 目標位置の直前で停止させることを考える。①には回転制御を利用し, ②に対しては直進制御と方向制御 (回転制御) を同時に行うことでロボットの位置制御を実現する。図 11 は, 位置制御を行ったときのロボット位置の XY プロットである。横軸と縦軸はカメラ画像 ( $640 \times 480$  [pixel]) における座標 ( $x, y$ ) を表す。制御開始前, ロボットの方向は  $-35[\text{deg}]$ , 目標マークはロボットから見て  $-123[\text{deg}]$ ,  $394[\text{pixel}]$  の距離に位置 (starting point) して

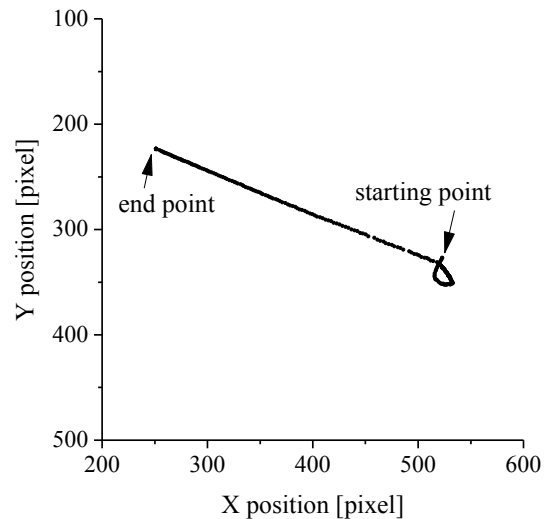


図 11 位置制御における移動ロボットの軌跡

Figure 11 A trajectory of a mobile robot during positioning control.

いた。図 11 を見ると, ロボットは最初に反時計回りに回転した後, 目標位置に向かって方向を制御しながら直進し, 最後に停止したこと (end point) がわかる。このようにして, 様々な初期条件 (ロボットの位置と方向, 目標マークの位置) の下で計測制御実験を行い, 移動ロボットを目標位置に誘導できることを確認した。

## 6. 提案システムの評価

提案教材の有効性を評価するため, 大阪電気通信大学工学部電子機械工学科3年生対象の実験科目 (90分 $\times$ 2コマ) において, 移動ロボットの位置制御に関する課題 (表 1) を実施し, アンケート調査を行った。受講生は, 2~4名のグループに分かれ, 1回の実験で2グループの受講生が課題に取り組んだ。アンケートの項目 (図 12) について, 実験終了後に短時間で回答できるように, 制御に対する理解と興味 (設問 1, 5), 可視化の効果 (設問 2, 3), 面白さ (設問 4) に焦点をあて, 4段階 (1~4, 数字が大きいほど肯定的) で評価することとした。

図 13 は, アンケートの結果 (回答人数 73 名) を帯グラフで表したものである。横軸は回答者の数で, 帯グラフの色は4段階の評価値に対応している。肯定的な回答 (3, 4) をした人数の割合と評価の平均値は, 設問 1 で 90.4% (3.0), 設問 2 で 87.7% (3.3), 設問 3 で 95.9% (3.4), 設問 4 で 95.9% (3.4), 設問 5 で 84.9% (3.0) となり, いずれの設問においても肯定的な回答が顕著であった。高い評価値を示した設問 2, 3 について, 可視化情報の ON/OFF が学習者の任意 (図 6) であったことを考慮すると, 多くの学習者が可視化情報を積極的に利用し, P 制御や I 制御の理解に役立てたと考えられる。さらに, 設問 4 の評価値を見ると, 移

表 1 実験課題

Table 1 Experimental task.

項目	内容
自動制御と手動操作の比較	実験の到達目標として、最初に自動で移動ロボットが目標位置まで動く様子(位置制御)を観察させる。続いて、手動操作でロボットの位置制御を体験させる。
ステップ応答の計測	ロボット回転時と直進時のステップ応答を計測する。ステップ応答の波形から移動ロボットの動特性を読み取る。
回転制御	①P 制御において、ロボットの方向を目標方向に素早く一致させる(角度偏差を 0 に近づける)ための比例ゲインを設計し、ロボットの動きを計測する。 ②PI 制御における比例ゲインと積分ゲインを設計し、ロボットの動きを計測する。 I 制御の働きについて考えさせる。
直進制御	P 制御において、ロボットを目標位置の直前で停止させる(距離偏差を一定値に近づける)ための比例ゲインを設計する。
位置制御	回転制御と移動中の回転・直進制御を組み合わせて位置制御を行う。目標位置へ素早く正確に到達するためのコントローラを設計し、ロボットの動きを計測する。

<p>Q1. 今回の実験で、P 制御(比例制御)、P I 制御(比例積分制御)について、実験前より理解が深まりましたか?                      4 とても深まった                      3 深まった                      2 ほとんどかわらなかった                      1 まったくかわらなかった</p> <p>Q2. 実験のとき、情報表示機能(モータパワーの矢印表示、角度偏差や距離偏差、P 制御、I 制御)をどのくらい利用しましたか?                      4 よく使った                      3 使った                      2 ほとんど使わなかった                      1 まったく使わなかった</p> <p>Q3. P 制御(比例制御)やP I 制御(比例積分制御)を理解するために、情報表示機能は役立ちましたか?                      4 とても役立った                      3 役立った                      2 あまり役に立たなかった                      1 まったく役立たなかった</p> <p>Q4. コントローラを設計し、移動ロボットを目標位置に移動させる実験は面白かったですか?                      4 とても面白かった                      3 面白かった                      2 あまり面白くなかった                      1 まったく面白くなかった</p> <p>Q5. 「制御」について実験前よりも興味や関心が高まったと思いますか?                      4 とても高まった                      3 高まった                      2 ほとんどかわらなかった                      1 まったくかわらなかった</p>
--

図 12 アンケート項目

Figure 12 Questionnaire items.

動ロボットの位置制御実験は学習者にとって面白いと感じられたようである。また、設問 1, 5 については設問 2, 3, 4 に比べて評価値の平均値はやや低いものの、実験前より制御に対する理解が深まり、興味が高まったと回答(評価

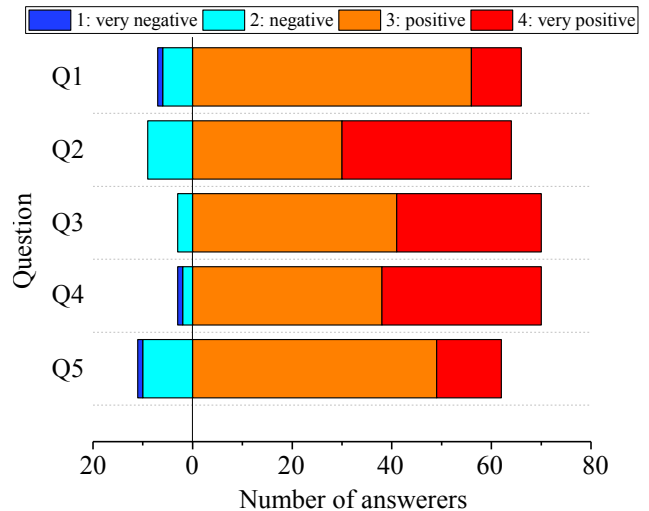


図 13 アンケート結果

Figure 13 Result of a questionnaire.

値 3 以上)した学習者の割合が 84%以上であった。以上のことから、提案教材は大学生対象の計測制御教材として有効であると言えるだろう。

## 7. まとめ

本研究では、フィードバック制御系の信号を視覚化する教材として俯瞰カメラを用いた移動ロボットの位置制御システムを開発し、実機実験によりロボットを目標位置に誘導できることを確認した。さらに、大学の実験科目に提案教材を導入し、その有効性を確認した。

提案教材は、制御の直感的な理解を支援するだけでなく、PC、安価な web カメラ、画像認識用マーカ及び移動ロボットを用いて様々なタスクを実行可能な環境を提供できる。今後は、中学生をはじめとする計測制御の初学者にとってより面白いと感じるタスクの検討とアプリケーションの開発に取り組む予定である。

## 参考文献

- [1] 井戸坂幸男, 青木浩幸, 李元揆, 久野靖, 兼宗進. 状態遷移概念を利用した制御プログラミングの学習効果. 日本産業技術教育学会誌. 2011, vol. 53, no. 3, p. 179-187.
- [2] 赤山聖子, 久保秋真, 久住憲嗣, 二上貴夫, 北須賀輝明. ソフトウェア初学者へのモデリング教育における MDD の活用. 2011, 組込みシステムシンポジウム 2011.
- [3] 横田寛明, 香山瑞恵, 小形真平, 橋本昌巳, 大谷真. ロボット動作設計を対象にした状態遷移図による概念モデリング教育へのモデル駆動開発方法論導入の効果. 2014, 情報処理学会研究報告. Vol. 2014-CE-126, no. 9.
- [4] "MATLAB/Simulink". <https://jp.mathworks.com/products/simulink/>. (参照 2016-11-09).
- [5] 西ヶ谷浩史, 青木浩幸, 井上修次, 江口啓, 紅林秀治. 自律型 3 モータ制御ロボット教材を用いた計測の授業. 情報処理学会研究報告, 2009, vol. 2009-CE-098, No.17.

- [6] 紅林秀治, 高山大輝. ボール式マウスを用いた位置を把握できる教材用自律型移動ロボットの開発. 日本産業技術教育学会誌. 2011, vol. 53, no.4, p. 243-253.
- [7] “OpenCV”. <http://opencv.org/>, (参照 2017-01-18).
- [8] “ESPLIB”. [http://www.geocities.jp/in\\_subaru/esplib/index.html](http://www.geocities.jp/in_subaru/esplib/index.html), (参照 2017-01-18).
- [9] 堀修. 2値画像処理. デジタル画像処理 [改訂新版]. デジタル画像処理 [改訂新版] 編集委員会編. 画像情報教育振興協会, 2015, p. 179-196.