

# LEGO MINDSTORMS™の工学教育への導入のための 機能拡張の提案と評価

Study for LEGO MINDSTORMS™ Application to Engineering Education II

今成 一雄

Kazuo IMANARI

## 1. はじめに

前回の報告<sup>1)</sup>では、LEGO MINDSTORMS™ (以下、MINDSTORMSと称する。)の工学教育への導入の可能性の検討と導入上の提案事項に関して報告した。自律型の作品を創造する場合、外部環境情報の収集方法とその処理(装置)が、キーポイントとなる。情報収集手段(センサ)は、主に自己と他者(環境)との位置関係情報収集のための距離計測(測距)センサと、自己の移動量を認識するためのセンサが挙げられる。MINDSTORMSはセンサをワイヤで接続するゆえに、その規格が合致すれば如何なる物も使用できる可能性を内包している。一方、情報処理装置は、RCXブロック<sup>2)</sup>であり、基本的にCPU (Hitachi H8/3292, 内蔵ROM 16KByte)、RAM (32KByte)の換装は望めない。

本紀要は、前回記載できなかった提案事項の詳細な内容、特にセンサブロックの拡張に関して、試作・試用とその検討結果について報告する。以下、第2章は距離測定センサの提案とその評価について、第3章は回転センサの提案とその評価について報告する。第4章では、機能拡張による今後の展開の可能性について検討する。

## 2. 高分解能中距離測定センサの試作と評価

### 1) LEGO MINDSTORMS™ 標準センサ<sup>2)</sup>

MINDSTORMSは、距離(接触)を計測できるセンサを標準で2種類用意している。

#### ① タッチセンサ

写真1は、タッチセンサの外観を示す。ブロックの先端から僅か2mm程度突き出たスイッチ部の圧込みによりon-off状態を作り出し検出する。受動センサであり、接触状態でのみ機能する。

#### ② 光センサ

写真2は、光センサの外観を示す。ブロックの先端に仕込まれたフォトトランジスタが、その隣に設置された赤色LEDの反射光の光量を検出する。電源を要求する能動センサであり、測定レンジは被測定物の条件等で変化するが20cm程度まで機能する。また、応用として外界から入射する可視光線・赤外線の高さも計測できる。一方で、被測定物との距離と反射光強度が、常に一定な比例関係にないと正常な測距は望めない。つまり、被測定物の状態や周囲環境に大きく依存する問題点を持つ。



写真1 タッチセンサ



写真2 光センサ

以上のように、MINDSTORMSの工学教育への導入を検討した場合、測距センサの能力は十分であるとはいえ、その拡張が非常に期待される。

## 2) 測距方式の検討

LEGOブロックは、様々な色（赤、青、黄、灰、黒 etc）や形状（ブロック、板、傾斜付、軸、球 etc）・材質（ABS、透明プラスチック、ゴム、スポンジ etc）の物が存在する。さらにこれらのブロックが、様々な位置関係で接合される。よって、出来上がった作品は光や音に関して複雑な反射・吸収特性を有すると考えられる。

超音波を応用した測距では、スポンジのような音波吸収体や、反射波を極端に散乱させる多面体構成に対しては正確な測定は期待できない。一般に回路サイズも大きくなり、空間分解能を上げるために周波数を上げると、測定可能距離が短くなるなどの相反する問題点を持つ。

レーザを応用した測距では、透明な材質や極端な多面体構成、反射光を返さない角度の鏡面に対しては正確な測定は期待できない。また、回路サイズは小さくできるが、その取り扱いには十分な注意が必要である、被測定範囲が極端に狭いなどの問題点を持つ。

以上の問題点を解消または低減した測定手段として、今回はPSD（Position Sensitive Detector）センサユニットを採用した。

## 3) PSDセンサ<sup>3)</sup>

図1は、PSDセンサユニットの構成・測距原理を示す。基本的には三角測量である。ユニットは赤外線発光部（Infrared LED, IRED）、受光部（PSD）、1組の光学系から構成される。発光部より投光された赤外線は、レンズを通して被測定物に照射される。照射された赤外線は、被測定物表面で散乱される。センサに戻ってきた一部の散乱光をレンズで集光し

PSDに照射する。このとき受光位置が、被測定物との距離によって変化する。

$$X = \frac{Df}{l} \quad [\text{m}] \quad (1)$$

PSDは受光位置Xに比例した電圧を出力する。

測定光源に赤外線を用いているため、取り扱いが容易である、測定光に広がりがある、被測定物の材質等の影響を受けにくい、低価格であるなどの長所が期待される。工業製品への応用としては、変位計などの精密測距やカメラのオートフォーカス、光電スイッチなどに使用されている。

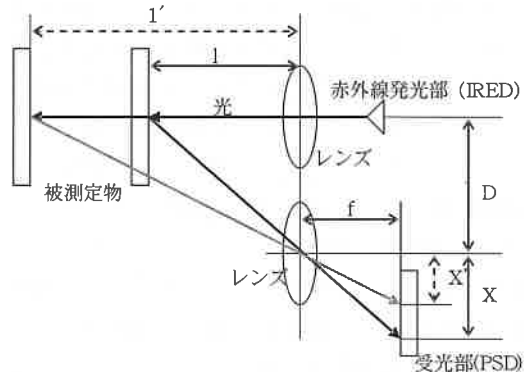


図1 PSDセンサユニットの構成・原理

## 4) 試作センサ回路

今回は、PSDセンサユニットにGP2D12（SHARP製）を用いた。これは、発光・受光系、レンズ系、信号処理系がすべて1つのユニットに収まっており、外部から電源を接続するだけですぐに使用できる、優れたユニットである。表1は、主なスペックを示す。

表1 GP2D12の主要スペック<sup>4)</sup>

項目	記号	範囲
動作電圧	$V_{cc}$	4.5 to 5.5 V
消費電流	$I_{cc}$	33 to 50 mA
出力電圧	$V_o$	-0.3 to $V_{cc}+0.3$ V
動作温度	$T_{opr}$	-10 to +60°C
測定範囲	$l$	100 to 800 mm
標準外形寸法		37 × 19 × 14mm

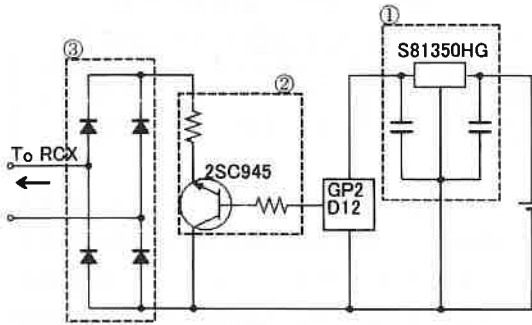


図2 PSDブロック回路図

図2は、本研究で試作したPSDセンサブロックの回路図を示す。電源は、安定性を確保するために、RCXの出力ポートから給電せず、ボタン電池（CR2016×2）による外部電源を用意し、低損失3端子レギュレータを通して給電した（図中①）。PSDからの出力はRCXセンサポートを駆動するための回路（同図②）を通してている。センサブロックとセンサポートとの接続は、コネクタプレート付きのワイヤを使用する（写真3）。コネクタプレートの接続方向が回転方向で任意となり極性の反転が発生するので、ブリッジ回路でこれを防止している（同図③）。

写真4は、センサブロックの外観を示す。標準ブロックの中に組み込み、取扱いを容易にしている。

RCXのプログラムにおいて、本センサは光センサとして取り扱われる。センサの出力は0～255の整数値としてRCXに取り込まれる

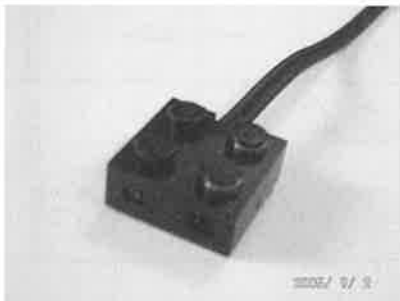


写真3 コネクタプレート

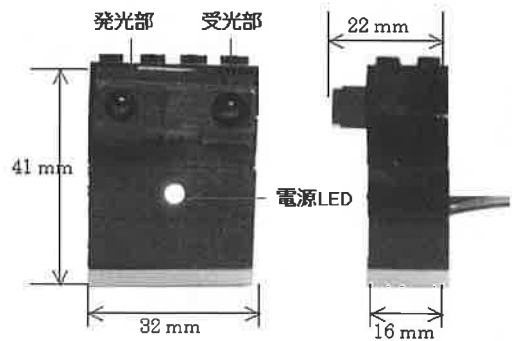


写真4 センサブロック外観

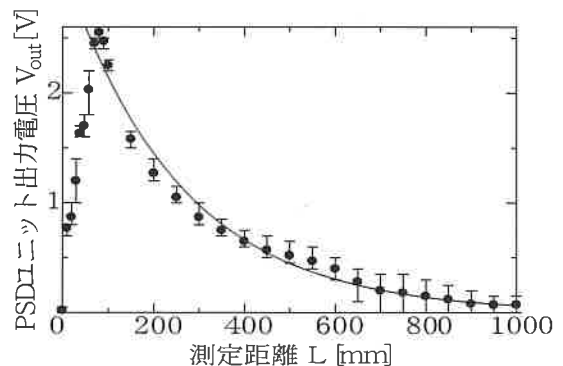
ため、予め、距離—出力値の関係を把握しておく必要がある。

#### 5) 試用と評価

図3は、PSDセンサユニットの測定距離L—出力電圧 $V_{out}$ 特性である。PSDセンサユニットと白色の紙製立方体を正対させ、2者の距離とPSDの出力電圧との関係を測定した。被測定ユニットは3個用意し、個体間のばらつきも確認した。出力電圧 $V_{out}$ は、 $L = 80 - 600\text{mm}$ の範囲で個体間のばらつきが少なく、実用範囲であるといえる。この範囲においてLと $V_{out}$ との関係式は、最小二乗法により

$$V_{out} = 3.16 \exp(-0.0039L) \quad (2)$$

にフィッティングされ、指数曲線を示している。

図3 測定距離L—出力電圧 $V_{out}$ 特性

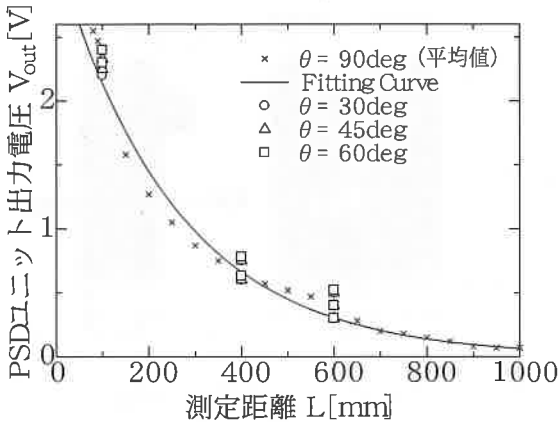


図4 角度依存特性

図4は、PSDセンサユニットの被測定物角度依存特性である。前出の紙製立方体とPSDとの角度 $\theta$ を変化させ、PSDの出力電圧 $V_{out}$ を測定した。図より、被測定物の角度依存性は、ほとんど無く、期待通りの非常に良い特性を示している。

図5は、試作センサブロックをRCXに接続してその出力を検出させた結果である。被測定距離 $L$ に対するRCX検出値 $Det$ の変化として表している。式(2)で確認したように、その関係は線形ではない。すなわち、実用上は計算又はテーブルによって $Det$ から $L$ へと変換する必要がある。

表2は、PSDセンサと標準センサとの静特

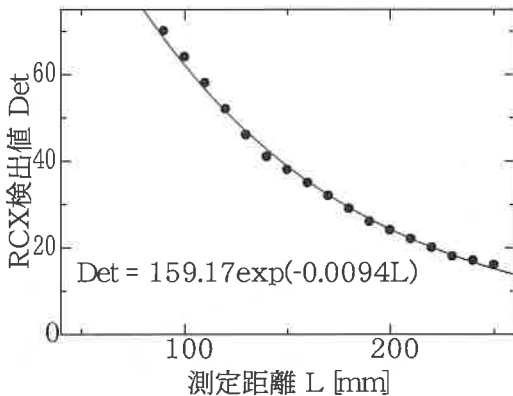


図5 距離-RCX検出値特性

表2 PSD型と標準型の比較

センサ	測定可能範囲 L	分解能 L
PSD型	80 - 250 mm	10 mm
標準型	0 - 200 mm	50 mm

性の比較結果を示す。PSDの出力は、測定距離が長くなると反比例的に減少する、つまり、分解能が低下する。ここでは、分解能が10mmを保障している範囲を表に掲載・比較している。分解能の低下を問わなければ、前述のように測定範囲は600mmまで伸長できる。改めて言及するまでも無いが、PSDセンサがMINDSTORMSに、非常に高性能な測距機能を与えることを示している。

試作センサの動特性を評価するために、簡単な比較実験を行った。RCXに直接4輪を取り付けた単純な自動車に、センサを搭載した。これを壁面から500mmの位置に配置し、壁面に向かって走行させ、壁面から200mmの位置で停止させる走行実験を行った。モータ出力は最低、壁の色は白と黒の2種類、測定回数は各10回とした。図6は、実験結果の比較図である。標準型センサによる走行実験では、再現性が乏しく、壁の色にもその結果が

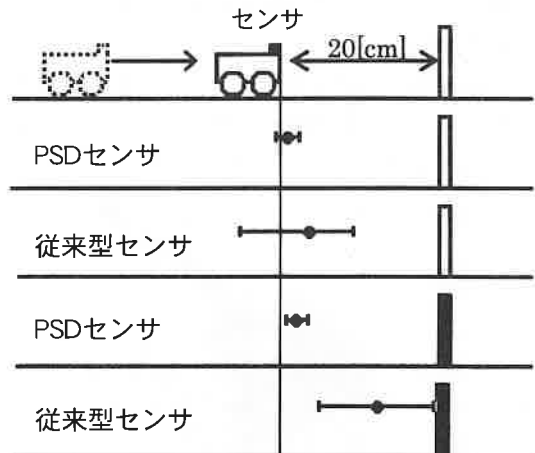


図6 動特性比較

大きく影響を受けている。一方、PSD型は壁の色にほとんど影響を受けず、かつ再現性も高い結果を示している。

以上から、本研究で試作したPSDセンサブロックは、中距離の測定において非常に高い性能を示した。また、本センサはユニット化されていることから衝撃に強く、取扱も容易であり、実用性は十分であると評価された。ただし、近距離・遠距離測定に対しては、他の測定手段が要求されると考えられる。

### 3. 高分解能回転センサの試作と評価

#### 1) LEGO MINDSTORMS™ 標準センサ<sup>5)</sup>

MINDSTORMSは、別売りのオプション部品で軸の回転角度を計測できる回転センサを用意している。

写真5は、回転センサの外観を示す。ブロックを貫通する軸の回転を22.5 degの分解能で計数・累積加算する。よって軸が1回転するとセンサ出力は +16変化する。センサは -32768~32767の範囲で検出結果を出力する。つまり本センサは、移動量の計測・検出が容易にできるように設計されている。また、分解能を向上させるためには、前段でギアによる増速を行えば実現可能である。一方で、出力が累積値であるため、速度・加速度を計測するためには、変化量の記憶・差分の計算・時間の計測、そして加速度・速度の計算といった処理を経ねばならない。これは、工学入門者にとっては高い障害であると言わざるを得ない。また、ギヤによる分解能の向上は、



写真5 回転センサ

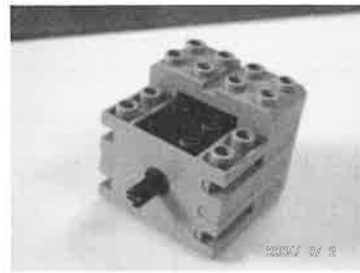


写真6 DCモータ

機械抵抗が大きくなり実用上の限界が存在する。

以上のように、軸の回転（加）速度を容易に検出・計測できるセンサがあれば、工学教育入門教材としての存在価値が高くなると考えられる。

#### 2) DCモータ

最近では、小型軽量な加速度センサが市販され、価格も安価になってきている。しかし、センサとRCXとのインターフェースや検出値の処理の煩雑さを考えるとMINDSTORMSで使用するには躊躇せざるを得ない。今回は、MINDSTORMSの標準ブロックであるDCモータ（写真6）に注目した。DCモータは、入力電圧に比例してその軸を回転させる電気部品である。と同時に、可逆動作可能な部品でもある。つまり、軸の回転速度に比例した電圧を出力する部品として使用できる。よって、RCXとのインターフェース回路を用意することで、センサとして応用できる。以下、これをモータセンサと称する。

#### 3) 試作回路

図7は、試作回路を示す。同図中①部は、分圧回路である。インピーダンスを上げ、モータが回路の電源を引き込んで回転しようとする現象を防止する。②部でモータの出力を整流し、最大値をクランプする。これを③部の電圧-電流変換回路で、0.1 [V] あたり約0.12 [mA]の電流（RCX検出値34に相当する）に変換して出力する。本回路はOP-ampを使

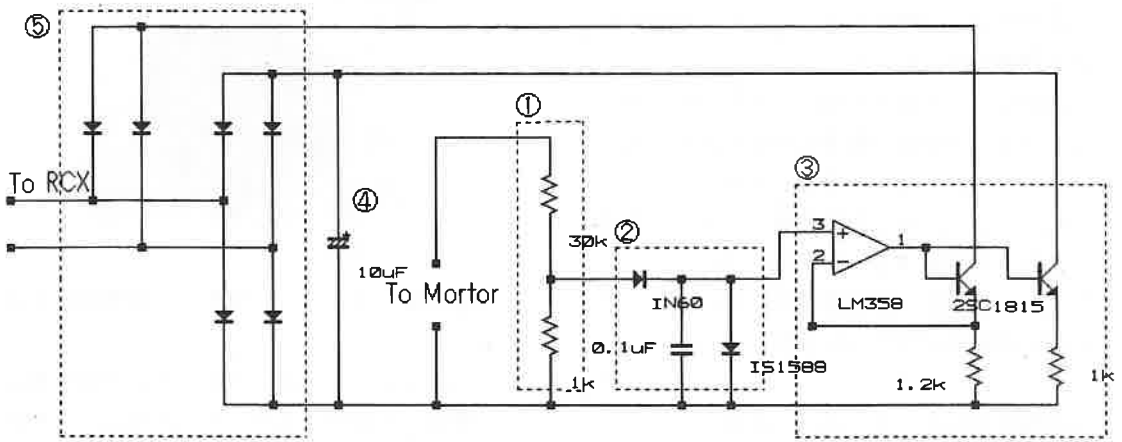


図7 モータセンサ試作回路

用するため、能動センサとして動作する。電源はRCXセンサポートから給電される（図中④、⑤部）。PSDセンサと異なり、消費電流が十分に小さいので、外部電源を用意せずとも安定動作が期待できる。モータセンサはRCXから見た場合、光センサと等価なセンサとして取り扱われる。

4) 試用と評価

図8は、モータセンサの回転速度 $V_r$ —検出値Det特性を示す。非常に良い直線性を示し、分解能も5.5 rpm/Detと実用上十分な性能を示している。

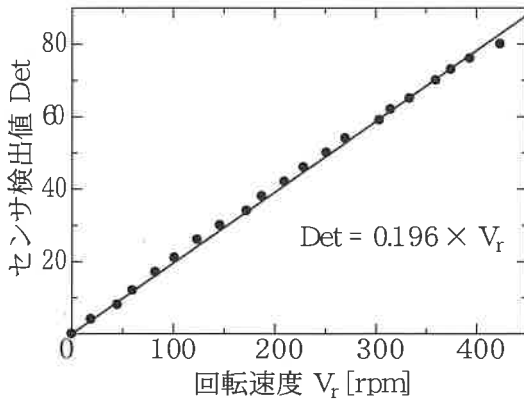


図8 回転速度—検出値特性

試作センサの動特性を評価するために、簡単な比較実験を行った。図9は、その模式図である。減衰振動をする振動台の上にRCXで制御された4輪台車を載せている。4輪台車は、回転センサまたはモータセンサが装備されている。4輪台車は、センサで検出された値が打消されるように動作制御されることで、免震制御を行うようプログラムされる。

図10は、実験結果を示す。図は、制御をしていない自由運動台車、回転センサで制御された台車（回転センサ台車）、モータセンサで制御された台車（モータセンサ台車）を比較している。自由運動台車は、振動台の動きに合わせて激しい減衰振動を起こしている。回転センサ台車は、振動周波数と振幅が大き

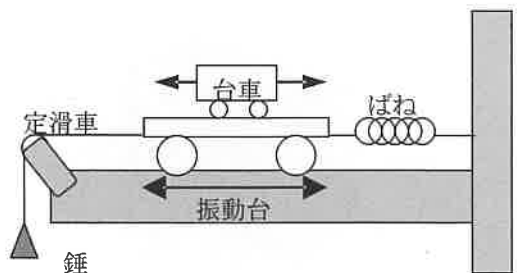


図9 動特性評価モデル

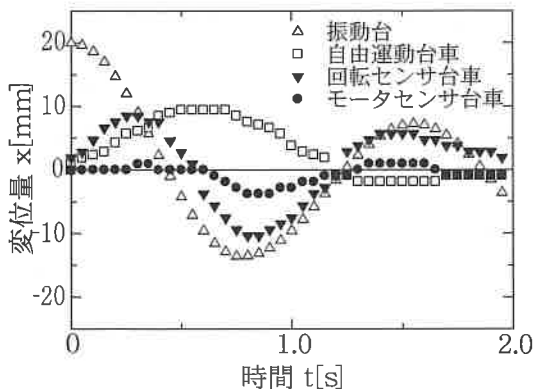


図10 動特性評価実験結果

くなり過制御状態にある。過制御の度合はプログラムの修正によって減少出来る。しかし、その解析にはより多くの計算を必要とし、工学教育入門者向けのテーマとはいえない。一方、モータセンサ台車は、回転センサ台車と比較し、短時間で台の振動に反応し、またオーバーシュートも減少している。反応速度が早く（追従性が高く）、可制御性に優れていると言える。

#### 4. まとめ

本紀要は、前回報告できなかったセンサブロックの拡張に関して、試作・試用とその検討結果について報告した。

距離測定センサとして、PSDユニットを応用したセンサブロックを試作し、その有用性を標準型センサと比較した。試作センサは、測定分解能を10mmに限定すれば、90 - 250 mmの範囲で、測定分解能に拘らなければ 90 - 600 mmの範囲で非常に安定した結果を示した。

回転センサとして、MINDSTORMSのセット同梱されている標準のDCモータを応用したモータセンサブロックを試作し、その有用性を別売りの回転センサと比較した。試作センサは、反応速度が早く、分解能・可制御性が非常に高い結果を示した。

これらのセンサを導入することで、より高度な工学教育が出来るものと期待される。今後は

継続して提案と試作・試行を行い、その詳細な結果を報告していきたい。

最後に、本報告をまとめるに当たり、実験・議論に参加・協力してくれた卒業研究生諸氏に感謝する。

#### 参考文献

- 1) 今成一雄, “LEGO MINDSTORMS™の工学教育への導入の検討と提案” 小山工業高等専門学校研究紀要第37号 (2005) .
- 2) 古川 剛 編, Jin Sato, 白川裕記, 牧瀬哲郎, 倉林大輔, 衛藤仁郎 著, “MINDSTORMS パーフェクトガイド”, 翔泳社 (1999) .
- 3) 佐々木康人, “PSDセンサユニットを用いた対戦型自立ロボット用測距センサの評価” 小山工業高等専門学校 卒業論文 (2000) .
- 4) SHARP, “GP2D12 Data Sheet” .
- 5) Michael Gasperi's LEGO Mindstorms Sensor Input Page, <http://www.plazaearth.com/usr/gasper/lego.htm> など

〔受理年月日 2005年9月5日〕

