

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第 1 3 号 平成 2 3 年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

組込技術を用いた高機能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第1報)	1
— 超音波センサアレイによるナビゲーションシステムへの適用 —	
観光客の行動計測技術と行動モデルに基づいた情報提供手法の研究開発(第1報)	7
水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発	13
— 自律走行ロボットの開発(第3報) —	
水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発	15
— 現地実証試験2011 —	
県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発(第2報)	18
身体障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第3報)	24
— スマートフォンによる電動車いすの運転操作 —	
身体障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第4報)	28
— 電動車いす用操作機器によるスマートフォン操作 —	
歩行機能診断を目的とした安価な重心動揺分析システムの開発	30
ジグ設計評価の構造解析に関する研究(第2報)	36
製造情報の可視化支援ソフトウェア部品の開発	41
人の動線推定に関する研究開発	43
— 移動量測定技術の基礎検討 —	
IEによる作業工程分析及び可視化手法の研究	47
【技術資料】	
非接触三次元計測システムの測定方法の検討	51
溝を有する飯碗の落下試験シミュレーション	53
カメラ画像とCADデータの重畳表示	55
VR技術を活用した電動車いす運転操作トレーニングシステム	57

組込技術を用いた高機能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第1報)

— 超音波センサアレイによるナビゲーションシステムへの適用 —

田畑 克彦 岩井 俊昭* 西田 佳史**

久富 茂樹 遠藤 善道 水野 渚 横山 哲也

Development of a New Wireless Sensor System using Embedded Technology (1st Report)

- Application to Navigation System using an Ultrasonic Transducer Array -

Katsuhiko TABATA Toshiaki IWAI* Yoshifumi NISHIDA**
Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO Nagisa MIZUNO Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 本研究では、無人搬送車(AGV)への適用を想定し、屋内外によらず、容易に経路変更が可能な新しいナビゲーションシステムの構築を目指してセンサシステムの開発を行っている。本センサシステムは、超音波センサのみを用いて構成し、超音波利用時に課題となる信号対雑音比を改善するために、空気中では適用事例の少ないフェーズドアレイ技術を用いていることを特徴とする。超音波ソナーシステムをAGVに搭載し、走行ルート上に設置された超音波ランドマークと通信すると同時に相対位置を計測しながら設定したルートを走行する。本報では、これまでの基礎研究の結果をもとにセンサシステムのベースモデルを試作し、その動作確認のため、近距離にある超音波ランドマークの位置推定を行った結果を報告する。

キーワード 超音波センサ、フェーズドアレイ、無人搬送車(AGV)、組込み技術

1. はじめに

現在、コストダウンや省力化のために製造現場内の搬送を目的とした無人搬送車(以下、AGV)が実用化され、商品化されている。現状のAGVは屋内の走行を目的としており、走行経路の設定は経路に沿って磁気テープや光反射テープを床面に貼るもの、あるいは床下に磁気誘導線を埋設し、それをAGV側のセンサがセンシングしながら走行する手法が代表的である。これらの方式は工場内の固定された経路を搬送する目的においては有用であるが、経路変更が頻繁に行われるケースへの適用は困難である。頻繁な経路変更に対応できる高精度なレーザレンジセンサを使用したシステムも開発されているが、価格は高く、経路設定も専用ソフトウェアを用いるためある程度の専門的知識が必要である。

上述の課題を解決するため、我々は屋内外によらず、

* 国立大学法人 東京農工大学大学院 生物システム
応用科学府

** 独立行政法人 産業技術総合研究所
デジタルヒューマン工学研究センター

経路の設定が簡単で、しかも低価格な新しいナビゲーションシステムの実現を目指し、それに供するためのセンサシステムの研究開発^[1~3]を行っている。このセンサシステムの特徴は図1に示すようにルート設定用のマークとして、磁気テープなどの代わりに超音波センサを使用している点である。超音波センサは、低価格でメンテナンスフリーであるため、コスト面や保守性の面で課題が少ないことが挙げられるが、騒音などの外乱に弱いとされる。そのため、信号対雑音比(SN比)を向上させるフ

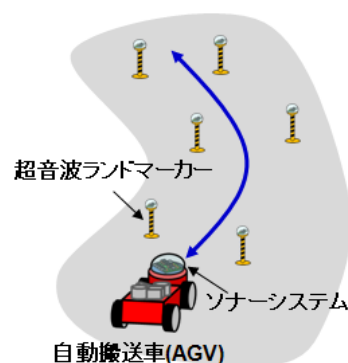


図1 超音波センサシステムによるAGVのナビゲーション

フェーズドアレイ技術を採用する。さらにルート上に配置したランドマーカー（以降“マーカー”と記す）に固有のIDを割り振る。このマーカーは割り当てられたIDを受信した時のみ応答するので、他のマーカーからの信号送信による混信を防ぐことができる。そして、AGV側の超音波アレイセンサシステム（以降“ソナーシステム”と記す）は、特定のマーカーを順次識別し、マーカーとの相対位置を計測しながら、設定した経路を走行する。

これまでの研究では、1個数百円程度の超音波センサ素子であってもフェーズドアレイによるビーム照射方向の制御が可能であることを確認した。また、本システムでは経路上の特定のマーカーと通信して相対位置を推定する手法をとるため、選定した超音波センサ素子のセンサ感度等を実験で把握し、通信速度を確認した^[1~3]。そして、1組のセンサシステムの原理モデルを試作し、オフラインによる基本仕様の設計と検証を行った^[3]。しかしながら、ナビゲーションシステムとして使用する場合には、連続した位置推定が必要となる。

本稿では、本年度に設計開発したセンサシステムの概要について述べるとともに、連続した位置推定が可能なセンサシステムに発展させ、その動作確認のために、近距離における連続位置推定を行ったので報告する。

2. 超音波フェーズドアレイの概要

この技術は、電子制御により図2のような各センサ素子から放出される超音波の位相をずらすことで、各センサ素子の波の重ね合わせとなるビームの照射方向を任意の方向に照射できる。そのため、各センサ素子の合成波であることからSN比が向上するので、従来のセンサ単体の出力や指向性ではSN比が小さくて検知できない領域を縮小できる。また、機械的な方向制御を必要としないことや、仮に一つのセンサ素子が故障しても他のセンサ素子でリカバーできることから、信頼性を高くすることができることも特長である。

図2は、3つの超音波素子を用いた1次元の超音波フェーズドアレイの例である。超音波ビームを θ_0 方向に送信する場合、この方向に対して超音波センサSp1～Sp3の波形の位相差を制御し、波面を形成することでビームの指向性をコントロールする。

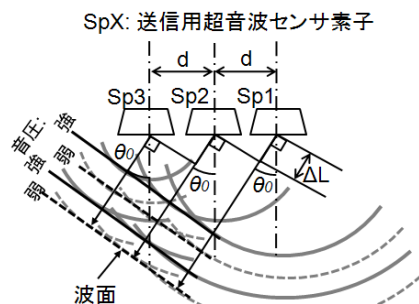


図2 フェーズドアレイ技術の原理

ここで、ある θ_0 におけるSp1とSp2、Sp2とSp3の行路差 ΔL は、次の式で表すことができる。

$$\Delta L = d \sin \theta_0 \quad (1)$$

ここで、 d はアレイの間隔[m]である。□また、 ΔL だけ進む時間差を Δt とすると、次の式で表すことができる。

$$\Delta L = c \cdot \Delta t \quad (2)$$

ここで c [m/s]はある気温 T [°C]における音速で、

$$c = 331.45 + 0.61T \quad (3)$$

で表すことができる。

よって、Sp1(Sp2)とSp2(Sp3)の送信タイミング差である(2)式の Δt を制御することにより、任意の方向 θ_0 に超音波の波面(ビーム)を照射することができる。

3. センサシステムの概要

3. 1 ナビゲーション手法

図1に示すように、AGVに搭載されたソナーシステムが、マーカーの位置を計測しながら、設定した経路を走行する手順を以下に示す。

(1)目標とするマーカーの探索

ソナーシステムは、探索対象のマーカーIDを送信しながら、フェーズドアレイによるビーム走査を行い、対象マーカーを探索する。

(2)探索対象のマーカーの応答

マーカーは、ソナーシステムから割り当てられたIDと同じ信号を受信した場合、規定された信号を送信して応答する。

(3)マーカーの位置計測

ソナーシステムはマーカーからの応答時間をもとに探索対象のマーカーとソナーシステムの相対位置を計測する。

(4)ロボット位置の変更（設定ルートの走行）

マーカーを基準としてロボット位置をコントロールする。

上述のシーケンスについて、超音波通信によるマーカーのロケーションシステムとして考えると、特定マーカーを探索するために走査する(1)、特定マーカーの位置を推定する(2)、そして特定マーカーの方向に超音波信号を送信して、短時間間隔でマーカー位置を更新し、追尾していく(3)により構成される。もし追尾中のマーカーを見失った場合には、(1)のマーカー探索に戻ってシーケンスを繰り返す。

3. 2 超音波データ通信形式

ソナーシステムとマーカーとの間で交信される信号の変調方式は、2値ASK (Amplitude-Shift Keying) を用いる。

図3は本データ通信の1パケットの内容である。本データ通信は後述するマーカーの位置（距離と方位）推定も兼ねるため、パルス伝搬時間や左右受信センサの時間差を測定し易いように、スタートビットとして常に先頭に1bitのパルスを送る。

次に複数の経路を走行することを想定し、グループビ

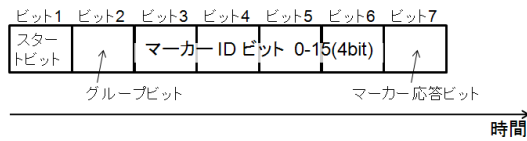


図3 超音波通信データフォーマット

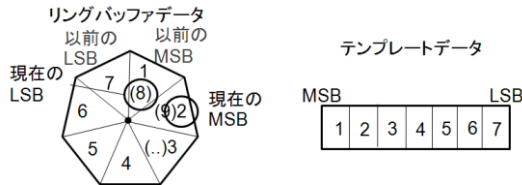


図4 通信データの識別

ット1bitが続き、そのあとにマーカーの固有IDである4bitのIDを割り当てる。そして、最後にソナーシステムからのマーカー探索信号であるか、マーカーからの応答信号であるかを区別するために、応答ビット1bitを用意する。応答ビットは、ソナーシステムからのマーカー探索信号の場合は“パルスなし”，マーカーからの応答信号の場合は“パルスあり”とする。

また、超音波データ通信速度は、これまでの研究^[1~3]における超音波センサ素子(日本セラムックス株式会社 AT40-10)の性能評価から625bpsに設定している。

3. 3 通信データの識別

マーカーとソナーシステムともに、受信した超音波信号を解析し、マーカーであれば応答すべき信号なのか、ソナーシステムであれば位置推定すべき信号なのかを解析し、識別する必要がある。マーカー側における解析信号の特徴は、その信号の到来タイミングが未知であるということである。このため、図4に示すように図3の通信パケットと同サイズのリングバッファを用いて随時パターンマッチングを行い、応答すべき信号が到来したかを判定する。ソナーシステム側は、超音波信号が10m往復する時間分のサンプリングデータをシステムのメモリに蓄積し、同様の手法でマッチングを行う。

なお、パルスの“あり”と“なし”の判断は、受信信号の電圧振幅に閾値を設定しており、その値は最大受信振幅の50%としている。

3. 4 マーカー探索のための超音波ビーム走査

ソナーシステムは3.1(1)で述べたように、対象マーカーを探索するため、フェーズドアレイによるビーム走査を行う。本節では、このための手法について検討する。図5に試作したソナーシステムを示す。図5の3×3素子からなる試作した超音波センサアレイにおいて、主ビーム指向角 θ_0 を0°と20°として超音波素子の送信タイミングを制御し、観測角 θ_{TR} を最小-60°〜最大60°まで変化させた時のビームパターンを図6に示す。なお、主ビーム指向角 θ_0 は、センサアレイの正面方向を0°とし、アジマス方向

へ超音波ビームを走査している。送信信号は、40KHzの搬送波送信と送信停止を10msec間隔で切り替える信号を送った。

図6の縦軸の利得 G_{1sp} [dB]は、1つの送信素子と受信器と正対させた場合（主ビーム角 $\theta_0=0^\circ$ および観測角 $\theta_{TR}=0^\circ$ ）における受信波の最大電圧振幅 $V_{1sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)$ [V]に対して、9つの送信素子からなるフェーズドアレイ送信器を用いた時の θ_0 および θ_{TR} における受信波の最大電圧振幅 $V_{9sp}(\theta_0, \theta_{TR})$ [V]の利得であり、次の式で定義する。

$$G_{1sp} = 20 \log_{10} (V_{9sp}(\theta_0, \theta_{TR}) / V_{1sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)) \text{ [dB]} \quad (4)$$

図より、意図した方向にビームを照射できており、得られる音圧は単一素子の12dB(4倍)以上で、ビーム幅は半値半減角で $\pm 10^\circ$ 程度であることがわかる。また、主ビーム角 θ_0 以外にもピークが生じているが、これはサイドローブとして知られているグレーティングローブまたは量子化ローブ^[4]であり、主ビーム角 θ_0 に制御した場合におけるサイドローブの発生角の理論値を表1に示す。

図6と表1を比較すると、隣り合うセンサ素子の1波長ずれによるグレーティングローブ θ_{g1} は、ほぼ理論値通り

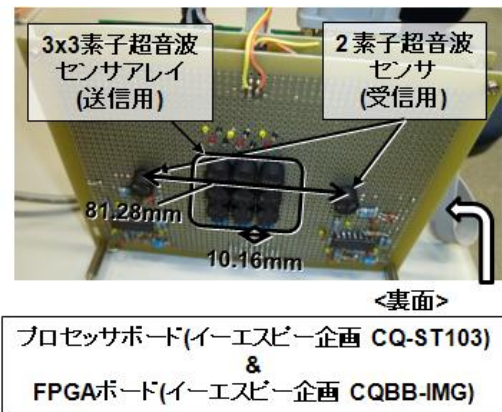


図5 試作ソナーシステム

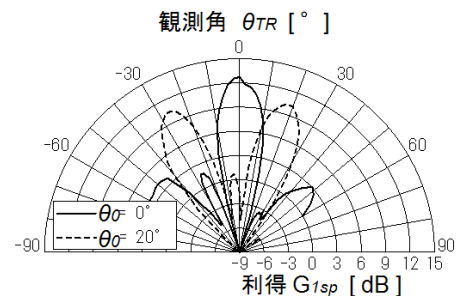


図6 フェーズドアレイビームパターン

表1 メインローブとサイドローブの出現角（理論値）

メインローブ角 θ_0 [°] $n=0$	サイドローブ角 [°]			
	グレーティングローブ角 θ_{g1}		グレーティングローブ角 θ_{sp1-3} & 量子化ローブ角 θ_{q1}	
	$n=-1$	$n=1$	$n=-1$	$n=1$
● 0.0	● -57.7	● 57.7	-25.0	25.0
● 10.0	● -42.2	-	-14.4	36.6
● 20.0	● -30.2	-	-4.6	49.9
● 30.0	● -20.2	-	4.4	67.3
● 40.0	● -11.7	-	12.7	-
● 50.0	● -4.6	-	20.1	-

の角度で発生しており、そのビーム幅と強度は主ビームと同等である。このため、マーカー探索にこのグレーティングローブ θ_{gl} を利用する。利用するグレーティングローブ θ_{gl} を表中の“●”として記す。

$\pm 60^\circ$ の範囲を 10° 刻みで走査する場合には、通常13方向のパルス列の送信が必要であるが、サイドローブで補完することにより、約半分の7方向に削減でき、マーカー探索時間の短縮が可能である。

3. 5 マーカー位置の推定

マーカー位置の推定はマイコンの処理負荷の軽減のため、FPGAで可能な限り高速ハードウェア処理を行わせたいため、比較的単純な送受信パルスの到来タイミングから推定する方法とした。概要を以下に述べる。

(1) マーカー方位角 θ_{MK} の推定

マーカー方位角 θ_{MK} は、左右受信センサの受信時間差を計測することにより次式を用いて推定する。

$$\theta_{MK} = 90 - \cos^{-1}\left(\frac{d\ell}{\ell_{RL} - \ell_{RR}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{d\ell}{\ell_{RL} - \ell_{RR}}\right) \quad (5)$$

ここで、 ℓ_{RL} - ℓ_{RR} は受信センサ間の距離、 $d\ell$ はマーカーから左右の受信センサ間の行路差であり、

$$d\ell = c \cdot dt \quad (6)$$

で表される。ゆえに、左右受信センサの信号到達時間の差 dt を測定することで、マーカーの方位角を推定する。

この実験における推定条件では、(5)式および(6)式の角度分解能を決めるパラメータとして、サンプリング周期を $10\mu\text{sec}$ に、左右受信センサ間の距離 ℓ_{RL} - ℓ_{RR} を 81.28mm に設定した。

(2) マーカー距離 ℓ の推定

左右受信センサの受信タイミングにより、計測できる距離は以下の式である。

$$\ell_{\text{Right}} = \frac{c}{2} \cdot (t_{R_flight} - t_{process}) = \ell \pm \frac{d\ell}{2} \quad (7)$$

$$\ell_{\text{Left}} = \frac{c}{2} \cdot (t_{L_flight} - t_{process}) = \ell \mp \frac{d\ell}{2} \quad (8)$$

ここで、 ℓ_{Right} 、 ℓ_{Left} 、 t_{R_flight} 、 t_{L_flight} はそれぞれ左右受信センサによる推定距離、左右受信センサに対して超音波信号の往復に要する時間である。また、 $t_{process}$ はマーカーのID認識に要する時間であり 13.1msec の一定時間で応答するように設定されている。さらに、 ℓ は左右受信センサを結ぶ線分の中点からマーカーまでの距離で、 $d\ell/2$

は左右受信センサの中点を基準とした場合の行路長のずれ量である。

(7)および(8)式の平均値を計算することで、 $d\ell/2$ が消去され、 ℓ を求めることができ、かつ値を安定化することができる。

$$\ell = \frac{\ell_{\text{Right}} + \ell_{\text{Left}}}{2} \quad (9)$$

なお、これらの方位や距離を計算するため、パルスが到来したと判定するタイミングは、設定した閾値（送受信パルスの最大値の50%に設定）を超えたタイミングを計測する。

4. ハードウェアの基本設計と開発

本研究では、図2に示すように1軸(θ_0)の超音波ビームをフェーズドアレイによって走査し、3. 1節に示した一連のシーケンスを実行する。

ハードウェア構成としては、ソナーシステムとマーカーの2種類がある。ソナーシステムは、フェーズドアレイによってマーカーを探索し、マーカーの位置を推定するなど、比較的複雑な処理を必要とするが、1つのAGVに1つ搭載すれば良いので、性能を重視し、プログラムを作り込むことができる構成とする。マーカーは、経路に多数設置することが想定されるが、自分のID信号が到来したことを識別し、送信するだけで良いため、コストを意識して、できるだけ単純な構成とする。

4. 1 ソナーシステム

図5の試作したソナーシステムの機能ブロック図を図7に示す。大きく分類すると、送信部、受信部およびコントロール部から構成される。

超音波信号の送信部は、図5に示すような 3×3 個の超音波センサ素子(日本セラミック(株)AT40-10)を使用する。ここで、素子間の距離 d は 10.16mm で、素子の励振電圧は 15V としている。この超音波センサ素子の共振周波数は 40kHz で、指向性は半減(-6dB)半角で $\pm 50^\circ$ である。

フェーズドアレイ制御は、並列処理に適しているFPGAボードにより行う。1軸のビーム走査のため、縦列

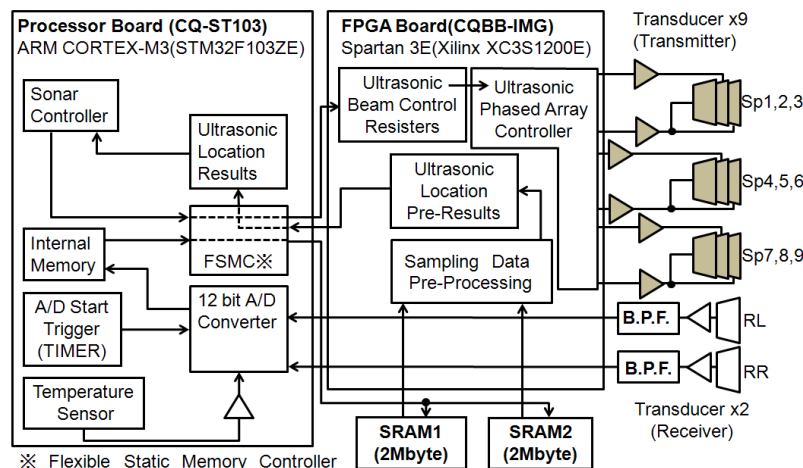


図7 試作ソナーシステムのブロック図

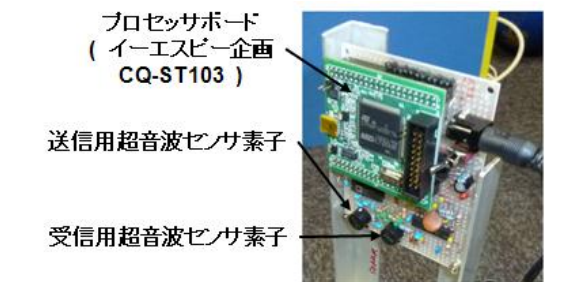
の3個は同相とし、横列間の位相差をコントロールする。位相コントロールのための時間タイミングの制御には、FPGA(Xilinx 社 XC3S1200E)に供給しているクロック 50MHz(20nsec)を使用し、その量子化位相誤差は、 $\pm 0.144^\circ$ である。なお、マーカー探索時の主ビーム角 θ_0 を決定する時間タイミングの制御変数や送信するデータ形式は、後述するマイコンボードから通知される。

受信部は、ソナーシステムの中心線に対し、左右対象に各1個ずつの超音波素子を81.28mmの距離で実装する(図5)。受信素子も送信素子と同じ型番のものを使用した。超音波素子の受信信号は、バンドパスフィルタとアンプを経て、FPGAボードのアナログ入力端子に入力され、増設したマイコンボードで左右2CH同時にAD変換される。増設マイコンボードのプロセッサはARM CORTEX-M3(型番STM32F103ZE, CPUクロック72MHz, 内蔵SRAM 64KBytes)である。

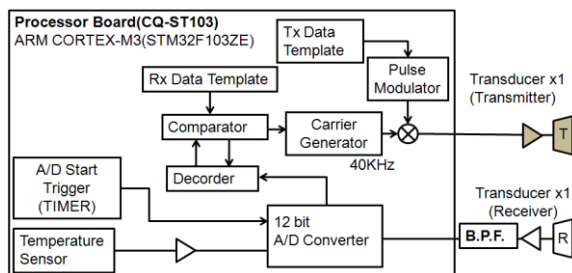
コントロール部は増設マイコンボードであり、マイコンに蓄積された左右2CHのAD変換データを、FPGAを介してFPGAボード上の外付SRAMに書き込み、FPGAにより超音波信号の伝搬時間と左右時間差を求めた結果を元に、マーカー位置を計算する。また、この結果から定めた、位相コントロールのためのタイミング変数や探索ID等の情報をFPGAに通知する。なお、マイコンボードにRS232C通信機能を付加し、探索コマンド送信や位置推定結果等のデータ受信が可能である。

4. 2 マーカー

試作したマーカーの写真とブロック図を、それぞれ図8(a)と(b)に示す。超音波センサ素子は送信用、受信用センサ素子ともに各1個とし、ソナーシステムと同じ型番のものを使用する。また、制御コントロール用としてマイ



(a)試作マーカー



(b)マーカーの機能ブロック図

図8 マーカー

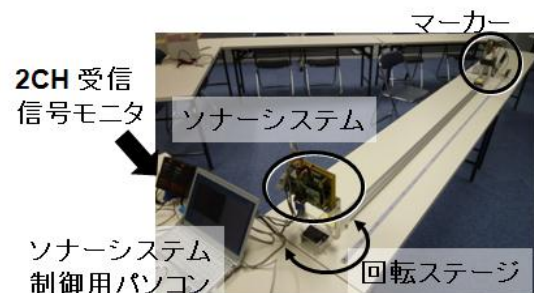
コンボードのみを使用する。受信部が超音波信号を受信し、図4のリングバッファによりIDデータを識別し、自分のIDであれば応答信号を送信するプログラムを搭載する。

5. マーカーの位置推定実験

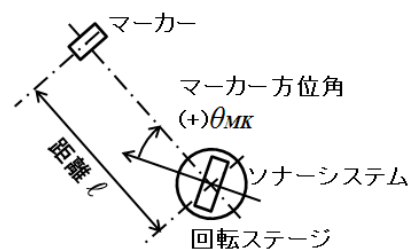
上述の機能を実現するために試作した超音波センサシステムを図9(a)に示す。同図は一連の動作を確認するために周辺機器も含めて開発した実験系である。回転ステージの上にソナーシステムを取付け、マーカーの方位角を変更して測定できるようにしている。実験座標系を図9(b)で定義する。

図10は距離 ℓ を680mm一定でマーカー方位角 θ_{MK} が 0° と 20° とした場合において、ソナーシステムが信号パルス列を200回送信し、その都度、マーカーの位置を繰り返し推定し、プロットした結果である。また、マーカー方位角 θ_{MK} を 0° から 60° まで 10° 刻みで変更して同様の位置推定を行った結果を表2に示す。表2中の成功率とは、信号の送信回数に対してマーカーからの応答信号を識別した回数との割合である。計測誤差は $\pm 27.0\text{mm}$ で、標準偏差もマーカー方位によっては、目標としている工場の床のマーキングテープ幅50mmの精度までは達しておらず、さらなる改良が必要である。

また、方位角は $+5^\circ$ 以内の誤差であるが、方位角が 30° 程度以上の大きな角度において、標準偏差が広がっている。これは左右受信センサの音圧が下がって雑音の影響を受けやすくなることと、3.5節のシステム設計で設定した値により、1サンプル時間遅れの角度分解能が方位 0° 付近の 2.4° から方位角の増加とともに徐々に減少して、方位 60° 付近では 4.8° になることも要因と考えられる。分解能の問題は左右受信センサ間の距離を広げることに対応できるが、センサ間の信号レベル差が大きくな



(a) 試作した一連の超音波センサシステム



(b) 実験座標系

図9 超音波センサシステムの動作確認のための実験系

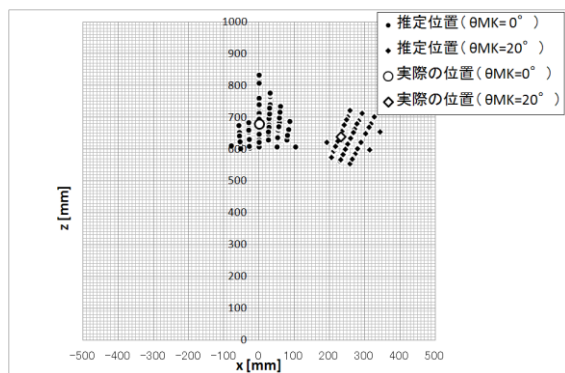


図10 L= 680mmにおけるマーカー位置推定結果

表2 マーカー方位角を変化させた場合の位置推定結果

マーカー方位角 [°]	ソナーシステムの推定結果					
	推定成功回数 [回]	推定成功率 SCS/200[%]	距離 [mm]		方位角 [°]	
			平均	標準偏差	平均	標準偏差
0	99	49.5	679.8	51.8	1.4	3.4
10	82	41.0	653.7	32.1	11.6	2.3
20	132	66.0	680.3	46.1	21.8	1.9
30	63	31.5	688.7	51.8	32.2	7.5
40	63	31.5	705.0	62.8	41.7	13.9
50	93	46.5	690.9	48.8	54.0	5.6
60	55	27.5	706.5	63.0	64.6	18.8

り、遠距離推定時における精度劣化に繋がるので慎重に検討する必要がある。

自動搬送車のような移動システムへの適用を考えた場合、位置推定周期も重要なファクターである。本ソナーシステムは、超音波信号が10m往復する時間だけ、データを蓄積した後、位置推定を行う手法であり、推定周期は約90msecであるため^[3]、200回の位置推定の所要時間は18secである。表2の推定成功数から、平均の位置推定周期は3.1Hzから7.3Hzである。目標としているレーザーレンジファインダによる更新周期8Hz^[5]と比較しても、さらに推定成功数を上げる必要がある。

6. まとめ

本稿では提案している自動搬送車の新しいナビゲーションシステムで利用することを目的とした超音波位置計測システムの開発を進め、連続動作可能なソナーシステムとマーカーを試作し、近距離L=680mmにマーカーが存在する場合の位置推定を行った。その結果、推定誤差はマーカーの方位角に依存し、±27mm以内で位置推定周期は3.1Hz～7.3Hzであることを確認した。

現状では、マーカー位置推定周期ならびに精度ともに課題が残る。今後は課題について検討し、改良を加えるとともに、マーカーが遠距離にある場合でも位置推定が可能なシステムとして開発を進める予定である。さらに、実際の移動装置に搭載し、その評価を行う。

文 献

- [1] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, “搬送車インタフェース (ナビゲーション) システムの基礎研究 (第2報) -超音波センサアレイの改良と通信速度の把握-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.12, pp.47-50, 2011.
- [2] 田畑克彦, 西田佳史, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いたナビゲーションシステム -超音波センサアレイの試作と通信速度の把握-”, 第29回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2011AC2N1-2, 2011.
- [3] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文集vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [4] 吉田孝監修, “改訂 レーダ技術”, 電子情報通信学会, 1996.
- [5] ジ ッ ク 株 式 会 社 , http://www.sick.jp/product/automatic/laser/ld_ha_scanner/NAV200/ (2012年3月現在)

観光客の行動計測技術と行動モデルに基づいた 情報提供手法の研究開発(第1報)

渡辺 博己 筒井 諒太 棚橋 英樹

Development of Technology for Measuring Tourist Behavior and Method for Providing Tourist Information based on a Location (1st report)

Hiroki WATANABE Ryouta TSUTSUI Hideki TANAHASHI

あらまし 観光を取り巻く環境が大きく変化の中で、観光地においては観光客のニーズを把握し、新たな観光サービスを提供する必要性が高まっている。一方、スマートフォンの普及に伴い、観光においても利用者の位置情報を用いたサービス（LBS：Location Based Services）が増加しつつあり、観光振興における需要の創出が期待されている。しかしながら、観光客の位置情報を管理することが可能な環境を有しなければ、適切な場所やタイミングで情報サービスを提供できず、その効果を把握することも困難である。本研究では、観光客の位置情報に基づいて観光情報を提供するプラットフォームの構築を目指し、スマートフォンに実装する情報提供アプリケーションを試作するとともに、スマートフォンに内蔵されるGPS等のデバイス情報に加え、アプリケーションの操作情報を取得する技術を構築した。

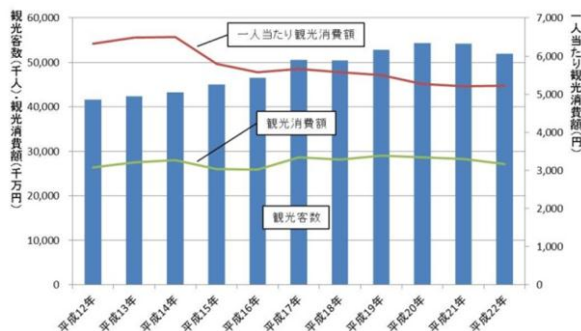
キーワード スマートフォン、LBS（Location Based Services）、行動計測、観光情報提供

1. はじめに

旅行形態が「団体から個人・グループ」に変化し、観光ニーズが多様化している中、岐阜県では、高速道路網の充実等により、観光地へのアクセスが改善され、観光客数が増加している。しかし、その一方で、日程の短縮化（日帰り）、あるいは範囲の広域化（一度に多数の観光地への立寄り）が進み、「宿泊から日帰り・安近短への志向」へと観光を取り巻く環境が大きく変化している。また、観光客数の増加により観光消費額はやや増加しているものの、観光客1人1回当たりの消費額は減少している（図1）。そのため、人口減少、景気低迷などの要因によ

り、今後大幅な観光客の増加が期待できない地域では、観光ニーズの把握が重要となっている。観光旅行の個人化により、主要観光ルート上にないところでも観光客が訪れるようになり、エコツーリズムやグリーンツーリズム、産業観光など、これまでにない旅行形態が注目を集めるようになることで、観光業界だけでなく、様々な分野で観光客の購買や消費意欲の向上などに繋がるサービスの提供が必要とされている。

これまで観光ニーズを把握する方法としては、訪問施設に関する統計データの利用やアンケート調査、観光ルートや体験イベントに関するモニター調査などが行われてきた。しかし、近年、GPSやRFIDなどによる位置計測技術を利用した行動調査や研究^[1~3]が急激に増加しつつあり、これに関連して、利用者の位置情報を用いたサービス（LBS：Location Based Services）がスマートフォンの普及とともに提供され始めている。周辺の観光施設や店舗、宿泊施設情報等（以下、観光コンテンツ）の表示、これらの施設の経路案内などのwebベースのサービスに加え、スマートフォンに搭載されたカメラから得られる映像に仮想的な物体として観光コンテンツを付加表示する拡張現実（AR：Augmented Reality）技術と融合したサービス、位置情報を利用したゲームや地域イベントなどのサービスが注目されており、観光振興における需要の創出が期待されている。



出典：岐阜県観光レクリエーション動態調査結果

図1 岐阜県における観光動態の推移

岐阜県では、スマートフォンを活用した地域振興に取り組むGIFU・スマートフォン・プロジェクトを推進しており、その中で、AR技術を用いたアプリケーションであるセカイカメラ^[4]（頓智ドット株式会社が提供するサービス）を利用し、観光コンテンツを提供している（図2）。セカイカメラは、スマートフォン内蔵のGPSにより位置情報を取得し、カメラを通して見る景色にエアタグと呼ばれる情報を貼り付けたり、他のユーザが貼り付けたエアタグを閲覧することが可能であり、観光看板、道案内看板や店舗紹介など、社会的インフラとしての機能を果たすアプリケーションである点が評価されている。しかし、セカイカメラで得られる利用者の位置情報やエアタグへのアクセス記録等は、サービスの提供者のみが利用でき、観光関係者が観光客の回遊状況や観光コンテンツの魅力など、地域が新たな観光サービスを立案するために必要な観光ニーズを把握することが困難である。

そこで本研究開発では、観光客の回遊情報や観光コンテンツへのアクセス情報（以下、行動情報）を取得し、県内観光地において位置情報に基づいた観光情報を提供するとともに、観光客の行動情報を分析することが可能なプラットフォームの構築を目指す。本稿では、スマートフォンを利用して観光情報を提供するアプリケーションを試作するとともに、行動情報を取得する技術を開発したので、その内容について報告する。

2. アプリケーションの設計

2.1 スマートフォンの選定

米IDC社が発表したスマートフォン市場の調査レポートによると、スマートフォン向けのOSのシェアに関して、2015年にはAndroidが43.8%、続いてWindows Phoneが20.3%、iOSが16.9%を確保すると考えられている（表1）。そのため、より多くの観光客に利用されるようにするためにはAndroidをはじめ、Windows Phone、iOS等にも対応したアプリケーションを開発していく必要があるが、本

表1 世界スマートフォン市場シェア推移予測

OS 名	2011 年(%)	2015 年(%)
Android	38.9	43.8
Symbian	20.6	0.1
iOS	18.2	16.9
BlackBerry	14.2	13.4
Windows Phone 7/ Windows Mobile	3.8	20.3
その他	4.3	5.5
全体	100.0	100.0

出典：IDC Worldwide Quarterly Mobile Phone Tracker

研究では、既に多くのシェアを獲得しているAndroidをOSとするスマートフォン（以下、Android端末）を対象にアプリケーションを開発することにした。ただし、Android端末に関しては、多くのメーカーが独自のOSとしてカスタマイズしているのに加え、様々なハードウェア構成をしており、それぞれの端末に合わせてアプリケーションを調整する必要がある。

2.2 アプリケーションの画面構成

アプリケーション画面は観光情報を提供する上で重要な役割を果たす。観光情報の提供方法としては、観光コンテンツを個々に並べ、コンテンツの説明や場所に加え、口コミやランキングを掲示する方法や、コンテンツの対象が実在する位置を容易に理解させるために、地図上にコンテンツへリンクするアイコンを表示する方法などがあるが、最近では、AR技術を利用し、観光対象の位置に合わせて、カメラから得られる映像にコンテンツへリンクするアイコンを重ねて提供する方法が注目を集めている。しかし、カメラから得られる映像にアイコンを表示する方法は、撮影が可能な観光対象については、位置を示す方法として適しているが、遮蔽されている観光対象についてもアイコンが表示される場合があるため、そのアイコンが示す観光対象の実際の位置を把握することが困難であり、地図を使った方法に比べ、目的地までの誘導方法としては利便性が低い。

そこで本研究では、地図上に対象の位置を示すアイコンを表示するマップビューと、カメラを通して得られる景色にも対象の位置を示すアイコンを表示するカメラビューを併用し、それぞれのアイコンから対応する観光コンテンツの内容を表示するコンテンツビューへリンクする構成とする（図3）。地図を使用する場合、地図は地平面に対し垂直上方から見た視点で描画されているため、通常、Android端末を水平に持って見る場合が多い。一方、カメラを通した映像を使用する場合、観光対象の多くは前方に存在するため、Android端末を垂直に立てて撮影する。そのため、Android端末の姿勢に応じて、水平に近くなればマップビューを、垂直に近くなればカメラビューを表示するよう自動的に切り替わるインタフェースを構築する。なお、各コンテンツには緯度、経度情報が紐付



図2 セカイカメラによる観光コンテンツの提供

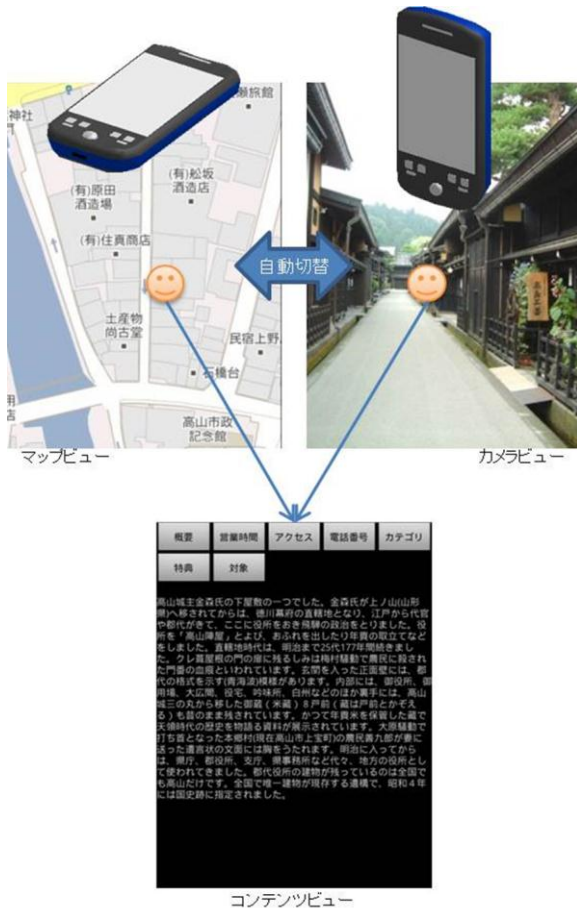


図3 アプリケーションの画面構成

けられており、リンクするアイコンはAndroid端末の位置情報に基づいてマップビュー、カメラビューに表示される。

2. 3 行動情報の取得

行動情報には、観光地における回遊情報と観光コンテンツに対するアクセス情報があるが、Android端末を使用して取得できる情報としては、端末に搭載されている様々なデバイスから得られる情報と、開発するアプリケーションを操作することにより得られる情報が考えられる。これらの情報の計測処理をアプリケーションのバックグラウンドで処理することにより行動情報を取得する。

Android SDKには、GPSや加速度センサなどAndroid端末に搭載されているデバイスの状態を測定することが可能なクラスが定義されており、各デバイスから得られるデータから表2に示すような回遊状況が推定できると考えられる。本研究では、これらのデバイスからAndroid端末の位置と方向を測定し、これらのデータに時間を付加して記録することにより、構築するプラットフォームにおいて、移動経路や滞留状態の分析が可能となるようにする。なお、アプリケーションでは、計測データとして表2に示す全てのデバイスの測定結果を記録する。

また、アプリケーションの操作情報は、前節の三つの

表2 Android端末のデバイスと推定可能な回遊状況

内蔵デバイス名	回遊状況	
GPS	位置	
加速度センサ	方向	移動状況(歩行、停止等)
地磁気センサ		
近接センサ	使用状態(ポケットの中等)	
照度センサ	使用状態(鞆の中等)	
マイクロフォン	周りの環境音	
バッテリー	使用状況	

ビューにおけるタッチイベントを取得し、イベント発生時間とともに記録する。なお、コンテンツビューについては、全ての観光コンテンツに対して同一のインターフェースとなるよう表示方法を統一する。具体的には、ボタン操作により、ボタンに表示された項目を説明するテキスト、あるいは画像を表示する方法とする。これは、表示方法が異なると、コンテンツ間での比較が困難になると考えたためである。

3. アプリケーションの試作

3. 1 マップビューの開発

マップビューでは、GPSで取得した緯度、経度に基づきAndroidマップを取得し、マップ上にAndroid端末の自己位置とGPS精度を描画した(図4)。自己位置はマップ下部寄りに描画しているが、これは、進行方向の情報を



図4 マップビュー

多く描画することで、移動を誘引する効果を狙ったものである。GPS精度は円の大きさを精度を表しており、精度が高ければ小さく、低ければ大きくなるようにした。

また、Android端末の方角角を取得し、方位に合わせてマップを回転させ、描画した。これは、利用者が画面を見続けることで方向を見失う可能性があるため、これを防止することを考慮した。なお、マップを回転させることにより方角を見失わないよう、画面右上に北を示すマーカーを描画した。

コンテンツビューへのアイコンは、マップの描画状況により表示位置を変えた。つまり、Android端末の移動や回転に応じて、アイコンの描画位置を変え、マップ上の位置と整合性が取れるよう処理した。また、マップビューはジェスチャ制御が可能であり、ピンチイン・ピンチアウトでマップの縮尺を変更できる。そのため、マップの縮尺についても、縮尺状況に応じてアイコンを描画するだけでなく、描画面積の変化に応じてAndroid端末から観光コンテンツまでの距離が変化するため、アイコンのスクリーンイン・スクリーンアウトについても対応した。

3. 2 カメラビューの開発

カメラビューでは、Android端末に内蔵されたカメラを通して得られた映像に、Android端末の自己位置の近くにある観光コンテンツに対応するアイコンを重ねて表示した(図5)。この時、Android端末、観光コンテンツの緯度、経度に合わせて描画するのは勿論だが、カメラ映像にアイコンをオーバーラップさせるためには、Android端末の高さ、及びカメラの画角を考慮する必要がある。そこで、

高さは1.5m、画角は短辺が30度、長辺が50度に設定した。なお、画角についてはズームレベル、機種間で差があるが、ズームレベルについてはワイド端、機種は固定とした。

また、カメラビューについても方角を見失わないよう画面右上にマーカーを表示した。マーカー内で白い部分が撮影されている範囲を示しており、上方向を北に設定した。

カメラビューでは、付加機能として写真撮影を可能にした。画像に加えて、緯度、経度、及び方角を同時に記録することが可能であるため、これらの情報を収集することにより、撮影スポットの把握が可能となる。

3. 3 コンテンツビューの開発

マップビュー、カメラビューに表示されるアイコンをタップすることで、アイコンに対応した観光コンテンツの内容を項目ごとに表示するコンテンツビューを開発した。コンテンツビューは、上からイメージデータ、各項目に対応したボタン、テキストデータの順に構成され(図6)、それぞれのボタンをタップすることで各項目のイメージデータ、テキストデータを表示することができる。また、コンテンツの内容によりボタンの数、項目名が自動的に設定される。

コンテンツビューはジェスチャ制御が可能であり、ピンチイン・ピンチアウトで文字サイズを変更することができ、表示しきれないテキストデータがある場合は、縦スクロールさせることにより全てのテキストを閲覧することが可能である。



図5 カメラビュー

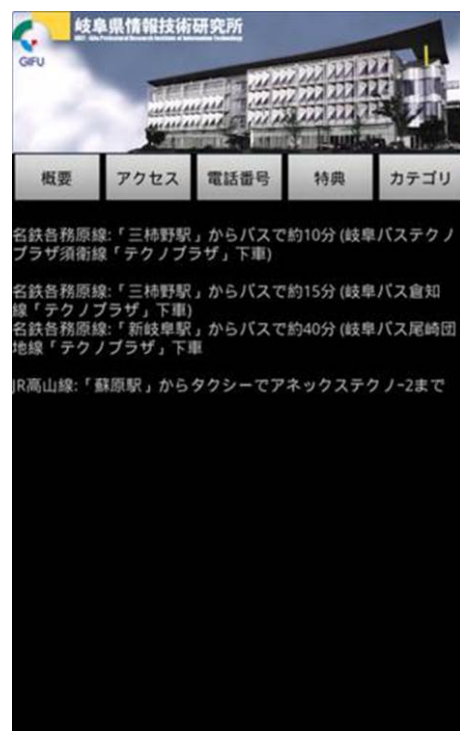


図6 コンテンツビュー

3. 4 位置情報の取得

Android端末を用いて位置情報を取得する場合、GPSにより緯度、経度を取得する方法が一般的であるが、GPSを使用することによりバッテリーの消費量が大きくなることが課題となっている。そのため、GPSによる測定間隔を大きくすることにより、バッテリー消費量を軽減する方法が考えられるが、計測分解能が低くなることが課題として残る。

そこで、GPS測定間隔を大きくした場合の測定間におけるAndroid端末の位置については、加速度センサの値を元に推定する方法を検討することを前提に、測定間隔の違いによるバッテリー消費量の差に関する実験を行った。実験では、同一メーカーではあるが、異なる機種を使って、バッテリー消費に関する傾向を確認した。使用したAndroid端末の主な仕様を表3に、実験結果を表4に示す。実験により、GPSの測定間隔を大きくするとバッテリー消費率は軽減される傾向にあるものの、高い効果を得ることはできないことが明らかとなった。

また、測定間隔の違いによる緯度、経度の測定誤差についても実験を行った。測定結果に基づいた移動経路の描画結果を図7に示す。実線が移動経路を示しており、円はGPS精度を表している。全ての実験について、同一経路を同じ方向にたどったが、測定間隔を10秒にしたとこ

表3 Android端末の主な仕様

機種	主な仕様
Samsung Galaxy Note	Processor ・1.4GHz Dual Core Display ・5.3" (1280 x 800 Pixel) Platform ・Android™ 2.3 Battery ・2500mAh
Samsung Galaxy Nexus	Processor ・1.2GHz Dual Core Display ・4.65" (1280 x 720 Pixel) Platform ・Android™ 4.0 Battery ・1850mAh

表4 GPS測定間隔とバッテリー消費率

測定間隔(秒)	Galaxy Note		Galaxy Nexus	
	測定時間(分)	消費率(%)	測定時間(分)	消費率(%)
0.5	62	26	63	30
1	63	20	64	32
5	65	27	64	31
10	60	21	61	28
20	61	23	61	29
30	62	21	62	27

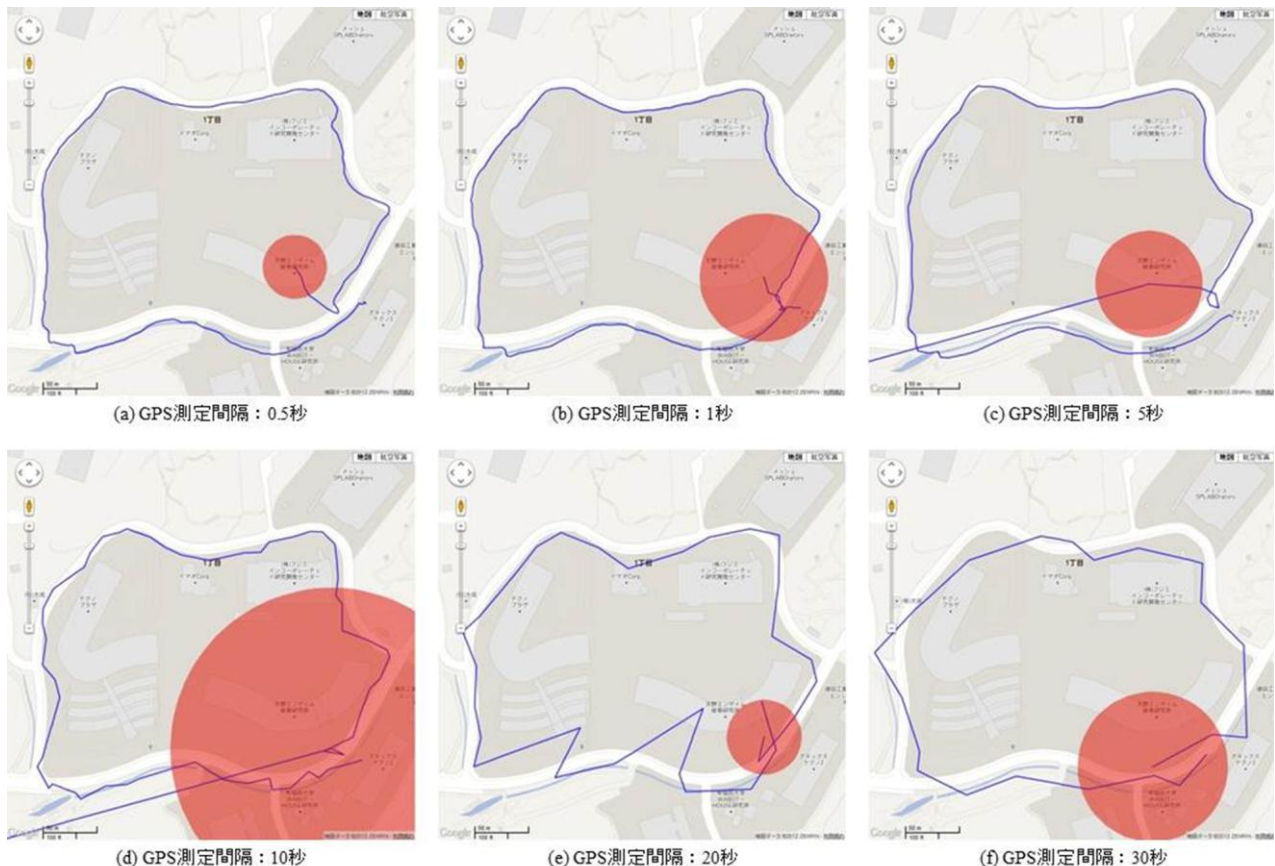


図7 GPS測定間隔と測定誤差

ろから誤差が目立ち始め、20、30秒では分解能の低下により、滑らかな動線を描けないだけでなく、測定誤差も大きくなった。

以上の結果を踏まえ、GPSの使用によるバッテリーの消費はあるものの、測定間隔を大きくしてもバッテリー消費率にはあまり影響しないこと、測定誤差が大きくなることから、分解能も考慮して、測定間隔は1秒とすることにした。

3. 5 その他の行動情報の取得

Android端末のデバイスに関する情報については、タイマー処理により100ミリ秒間隔で取得し、10秒ごとにファイルに書き込む。また、アプリケーションの操作に関する情報については、イベント発生時に取得し、その都度、ファイルに書き込む。

現在、アプリケーションはスタンドアローンで動作しているため、ファイルへの書き込み処理を行っているが、サーバとのネットワーク接続が確立した場合は、書き込み処理をサーバへの送信処理に変更する予定である。

4. まとめ

急速に普及が進むスマートフォンを利用し、観光客に観光情報を提供すると同時に、観光客の位置情報と観光情報を提供するアプリケーションの操作情報を取得する方法について検討した。

観光客の位置情報を把握することにより、これらを時系列に表示すれば、観光客がよく利用する、あるいは、利用しない道路などの移動経路が分析できる。また、位置情報を地図上にプロットすることで、よく利用される滞在場所、その滞在時間が分かる。さらに、トイレの利用状況、駐車場による訪問エリアの差、何処から来て何処へ行ったのかなどの観光ニーズについても分析が可能となる。

観光情報を提供するアプリケーションの操作情報からは、観光コンテンツに関する閲覧回数や閲覧時間が分かる。これらにより、コンテンツに対する興味度、コンテンツ間における閲覧順序や閲覧回数に関する相関などの観光ニーズが分析できると考えられる。また、アプリケーションの操作情報については、コンテンツの有用性を判断する要素となり得るため、閲覧状況を情報提供者にフィードバックすることにより、情報更新の必要性を促すことが可能になる。

今後は、多くの観光コンテンツを収集し、それらに緯度・経度情報を加えたコンテンツデータベースを構築するとともに、観光客の位置情報を受信し、それに基づいて観光コンテンツを送信することが可能なネットワークプラットフォームの構築を目指す予定である。また、他の観光客の行動情報に基づいて、観光情報をレコメンドするサービスについて検討する。

文 献

- [1] 長尾光悦, 川村秀憲, 山本雅人, 大内東, “GPSログからの周遊型観光行動情報の抽出”, 電子情報通信学会技術研究報告ICS78, pp.23-28, 2005.
- [2] 野村幸子, 岸本達也, “GPS・GISを用いた鎌倉市における観光客の歩行行動調査とアクティビティの分析”, 日本建築学会総合論文誌, Vol.121, No.1542, pp.70-77, 2006.
- [3] 矢部直人, 有馬貴之, 岡村祐, 角野貴信, “GPSを用いた観光行動調査の課題と分析手法の検討”, 観光科学研究, Vol.3, pp.17-30, 2010.
- [4] セカイカメラ, <http://sekaicamera.com/>.

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

ー 自律走行ロボットの開発(第3報) ー

光井 輝彰 田畑 克彦 藤井 勝敏 横山 哲也
遠藤 善道 陶山 純* 葛谷 和己**

Development of a Small Weeding Robot "AIGAMO ROBOT" for Paddy Fields

- Development of an Autonomous Moving Robot (3rd Report) -

Teruaki MITSUI Katsuhiko TABATA Katsutoshi FUJII Tetsuya YOKOYAMA
Yoshimichi ENDO Jun SUYAMA* Kazumi KUZUYA**

あらまし 環境にやさしい農作業を推進する現場では、除草剤に代わる有効な除草手段が求められている。そこで、水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の研究開発を進め、ロボットの改良開発と除草効果の検証を行ってきた。今年度は現地実証試験においてシーズンを通してロボットの運用を行い、実用化に必要なロボットの改良点を洗い出し、これを基にロボットの改良開発を行った。

キーワード ロボット, 自律走行, 水田除草, 現地実証

1. はじめに

食の安全や環境に関する意識の高まりの中で、化学合成農薬・化学合成肥料の使用を減らした安全で環境負荷の少ない農業が望まれている。しかし、手間のかかることが普及の障害となっており、特に除草剤を使用しない場合の除草作業は、農家の大きな負担となっている。そこで我々は、除草剤に代わる新たな除草手段として水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)を提案し^[1]、平成20～21年度には経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の委託研究において自律走行機能を備えたロボットを開発した。これをベースに、2010年度からは農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の委託を受け、稲の栽培体系まで含めたロボットによる除草技術の実用化研究を開始した。今年度は現地でシーズンを通してロボット^[2]を運用し、諸機能の検証とそれを基にしたロボットの改良開発を行った。

2. 現地実証試験における課題

現地実証試験でのロボット除草区の概要を表1に示す。羽島、柳津それぞれに1台ずつロボットを準備し、農家にはシーズンを通してロボットによる除草作業と洗浄や充電などのメンテナンスを行って頂いた。除草作業は週2

表1 現地実証試験区概要

	羽島A	羽島B	柳津A	柳津B
面積	約1900㎡	約970㎡	約950㎡	約1000㎡
品種	日本晴	ハツシモ	ハツシモ	ハツシモ
移植苗	中苗(マツ)	成苗(ボツ)	成苗(すじ播き)	成苗(すじ播き)
条間	30cm	33cm	33cm	33cm
代かき	5月21日	5月30日	6月6日	6月20日
移植	5月23日	6月3日	6月9日	6月23日
ロボット 走行初日	5月26日	6月6日	6月13日	6月27日
ロボット 走行最終日	6月30日	7月11日	7月11日	7月22日

回とし、試験区2か所で作業が重なる期間は、1台のロボットで2つの試験区の作業を連続して行った。ロボットの自律走行に必要なほ場条件は、以下のとおり設定した。

- ・稲列は交わずに終端がほぼ揃っている
- ・終端部分に稲を植えないスペースを設け、終端認識用の波板を設置する

ロボットの除草作業中は監視者を置き、ロボットの動作具合を常に確認した。稲が生長しロボットの走行が困難になった時点で除草作業を終了したが、試験区の条件によって作業期間には差が出た。図1は除草作業5回目の各試験区の様子であるが、同じ5回目でも稲の生育が大きく異なる事が分かる。

ロボットの自律走行は昨年と比較して安定し、各試験区で除草作業期間中の様々な環境条件に対応出来る事を確認した。しかし、浮草の大発生や稲列終端部の条間の膨らみ(図2)など、想定以上の外乱が発生した際には、稲列追従走行が不安定であったり、折り返し後の稲列進入に失敗したりする課題が確認された。このような場合、

* みのる産業株式会社

** 株式会社常盤電機



図1 各試験区の稲の生育状況（5回目の除草作業時）左から羽島A, 羽島B, 柳津A, 柳津B



浮草が大発生した水田 条間が膨らんだ稲列終端部分
図2 自律走行に失敗した場面



転倒防止で停止 利用者に届いたメール
図3 SMSメール送受信機能

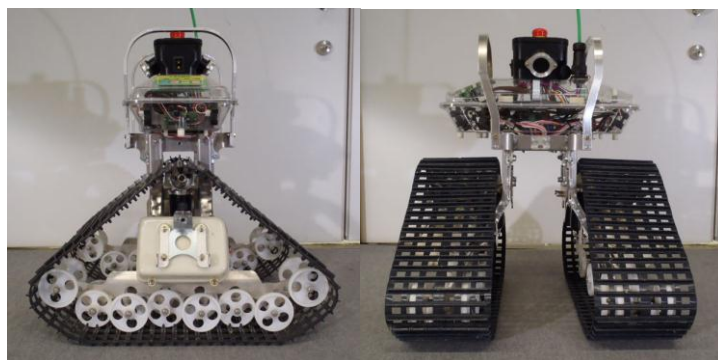
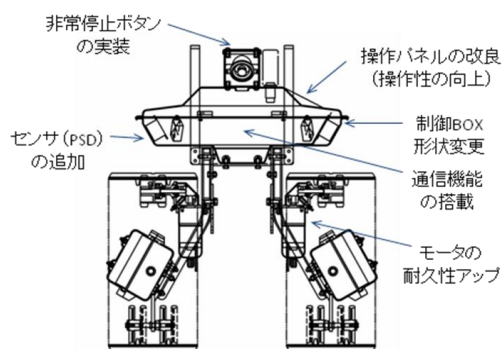


図4 改良機と主な改良点



監視者がラジコン操作に一時的に切り替えてロボットの動作を補正してやり、除草作業を継続させた。

3. ロボットの改良設計

現地実証で確認した自律走行の課題の他、現場の抵抗が大きい波板の設置条件をなくすために、カメラ以外のセンサとの併用を検討した。センサとしては安価なPSD（測長センサ）を利用することとし、改良機の設計に反映させた。また、遠隔地の利用者に作業の進捗やロボットの状態を知らせるための通信機能について、コストや運用性、拡張性等の観点から検討を進め、携帯電話網を利用したSMSメール送受信機能（図3）を実装した。その他、現地実証から得られた要望を含め、安全性やロボットの開使用勝手を向上させるための改良項目を検討し、改良機の開発を進めた。図4に開発した改良機を示す。

4. まとめ

現地実証試験を通してロボットの自律走行機能や使用勝手について検証し、この結果をロボット改良機の開発に反映させた。ロボットの自律走行機能の改良について

は、PSDを併用した外乱対策や稲列終端の折り返し制御シーケンスの改良について検討を進める必要がある。来年度はこの改良機を用いて現地実証試験を繰り返し、ロボットの実用化に向けた改良を進める予定である。

謝 辞

本研究は、みのる産業株式会社、株式会社常盤電機、岐阜大学、中山間農業研究所、農業経営課、岐阜農林事務所の協力の下、農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の委託を受け実施しました。また、アイガモ稲作研究会、主穂営農には、現地実証試験において多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 光井輝彰, 小林孝浩, 鍵谷俊樹, 稲葉昭夫, 大場伸也, “アイガモロボットの開発”, 日本ロボット工業会機関誌, ロボット177号, pp.20-25, 2007
- [2] 光井輝彰, 平湯秀和, 田畑克彦, 飯田佳弘, 陶山純, 葛谷和己, “水田用小型除草ロボット (アイガモロボット) の開発—自律走行ロボットの開発 (第2報)—”, 第12号, pp.33-35, 2011

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

－ 現地実証試験2011 －

光井 輝彰 田畑 克彦 藤井 勝敏 横山 哲也 遠藤 善道
吉田 一昭* 遠山 敬司* 神田 秀仁** 広瀬 貴士***

Development of a Small Weeding Robot "AIGAMO ROBOT" for Paddy Fields

- On-the-Spot Practicality Evaluation 2011 -

Teruaki MITSUI Katsuhiko TABATA Katsutoshi FUJII Tetsuya YOKOYAMA Yoshimichi ENDO
Kazuaki YOSHIDA* Keiji TOYAMA* Hidehito KANDA** Takashi HIROSE***

あらまし 農業の分野へロボット技術を応用することで、新たな除草手法を用いた水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発を進めてきた。これまでは主に中山間農業研究所や大学の試験圃場で実験を行い、除草効果の検証や自律走行機能を含めたロボットの各種機能について検討を行ってきた。本年度は、農家の現地圃場において実際にシーズンを通したロボットの運用を行い、本除草技術の実用性について検証を行った。

キーワード ロボット, 水田除草, 除草剤削減, 現地実証

1. はじめに

食の安全や環境に関する意識の高まりの中で、有機栽培や減農薬栽培などの安全で環境負荷の少ないクリーンな農業が行われつつある。ここでは除草剤についてもその使用を控えるための様々な手法が試みられているが、除草効果や費用、労力の面で課題を残しており、水稻有機栽培では除草作業が直接労働の約3割を占める^[1]ほどである。そこで我々は、新たな水田除草手段として、水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発を進めてきた^{[2][3]}。そして、平成22年度からは農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の委託を受け、当該ロボットによる水田除草を実用的な除草技術として確立するための研究開発を開始した。今年度は県内農家の協力を頂き、実際にシーズンを通してロボットを運用し、除草効果やロボットの諸機能について実用性を検証した。

2. 現地実証の概要

協力を依頼した農家には、ロボットの運用や圃場管理について事前に説明を行い、本除草手法に適した現地実証圃場の準備をしていただいた。除草作業開始後は、ロボットの運用からメンテナンス、日々の圃場管理を主体

表1 諸元	
全長	500mm
全幅	450mm
高さ (クリアランス高)	500mm (300mm)
クローラ幅	150mm
全備重量	9200g
モーター	7.2Kgf-cm 18.5W x2
バッテリー	Li-ion 24V-7.0Ah
走行時間	約3時間
作業効率	約10a/h



図1 ロボット



図2 株間除草機構を装着したロボット

的に実施していただき、日々の作業や気付いた点について記録を取った。除草作業はロボットの自律走行機能で行い、何らかのトラブルが生じた際には職員が対応した。

利用したロボットを図1に、諸元を表1に示す。図2はチェーンタイプの株間除草機構を装着した状態である。株間除草機構は、クローラ走行だけでは土壌攪拌による濁りの効果しかなかった株間に対して、チェーンで土壌表面を掻きだすことで除草効果を向上させる機構である。

* 岐阜県農政部農業経営課

** 岐阜県農政部岐阜林事務所

*** 岐阜県中山間農業研究所



図3 試験区 右から順に 羽島A 羽島B 柳津A 柳津B

表2 試験区概要

試験圃場 場所	試験区名	品種	移植日 (植代)	移植密度 (株/㎡)	施肥	防除	除草作業 (合計作業回数)	残草調査	収量調査
羽島A	ロボット	日本晴	5/23 (5/21)	15.1	牛糞堆肥、 基肥、穂肥	無農薬栽培 のためなし	5/26～6/30 (11)	7/5	9/22
	機械除草						6/27、7/16 (2)		
	無処理						-		
羽島B	ロボット	ハツシモ 岐阜SL	6/3 (5/30)	11.7	牛糞堆肥	有機JAS のため無し	6/6～7/11 (11)	7/15	10/13
	あいがも						-		
柳津A	ロボット	ハツシモ	6/9 (6/6)	11.7	基肥、穂肥、 化学肥料を 用いた分肥	箱施薬のみ	6/13～7/11 (9)	7/15	10/13
	無処理		6/23 (6/20)				-		
柳津B	ロボット						6/27～7/22 (8)	7/25	10/13

注1) ロボットの除草作業は週2回の頻度で実施

表3 調査結果

試験圃場 場所	試験区名	生育調査(7月)			残草調査		収量調査				
		草丈 (cm)	茎数 (本/㎡)	葉色 (SPAD値)	残草数 (本/㎡)	残草重 (g/㎡)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本/㎡)	収量 (kg/10a)	等級
羽島A	ロボット	58	355	43	1031	75	86	23	271	491	3
	機械除草	55	411	44	1058	85	84	21	340	398	3
	無処理	58	383	43	1317	164	85	24	247	467	3
羽島B	ロボット	57	435	44	0	0	94	22	255	346	2
	あいがも	57	411	42	0	0	88	21	264	347	3
柳津A	ロボット	60	455	45	153	9	100	21	293	514	2
	無処理	55	442	44	35	72	92	20	264	421	1
柳津B	ロボット	58	537	45	303	29	89	20	347	418	1

試験区毎に苗と土壌の状態から取り付ける時期を判断し、早い試験区では1回目の除草作業から、土壌が軟弱な試験区では3回目の除草作業から利用した。そして、稲が生長し、ロボットの動作に支障が出てきた時点で取り外した。

試験区は平坦地ではあるが2地域の圃場から2か所ずつ、計4か所を準備した(図3)。栽培時期や苗の種類等は試験区毎に異なるが、作業頻度(週2回)や水管理(常に5cm以上湛水)に関しては同様に行うようにした。試験区の概要を表2に示す。稲が生長しロボットの走行が困難になった時点で除草作業を終了し、残草調査を行った。その後、坪刈りに必要な面積をそのまま収穫時期まで放置し、収量調査を行った。

3. 除草効果の検証

試験区毎の調査結果を表3に示す。残草調査の結果については、ロボットの除草区と他の試験区との間に大きな差はなく、むしろ圃場間での差が大きかった。前年の雑

草発生量や湛水深維持状況が残草結果に大きく影響したと考えられるが、どの圃場でも水位を落とさないで管理出来ていれば、残草量はさらに減っていたと考えられる。

収量調査の結果は残草調査同様に、圃場間での差はあるが試験区間に大きな差は見られなかった。以下に、圃場毎の状況をまとめる。

a) 羽島A(箱育苗によるやや大型の中苗移植 約1900㎡)

例年機械除草を行う圃場であり、これまでに十分な雑草除去ができておらず、移植時には多量の雑草種子が浮遊する状況が見られていた。さらに、台風の影響などで移植後1週間は湛水深を深くできず、土壌の露出する場所では2週目には雑草(優占雑草: ホタルイ)が繁茂してしまった。苗の活着が遅く、株間除草機構の装着を3回目から行ったが、大型化した雑草に対しては、チェーン方式の株間除草の効果は限定的であった。

b) 羽島B(ポット育苗による中苗移植 約970㎡)

例年アイガモ放飼による除草が行われている圃場であるため、従来から残草が少ない圃場であった。試験区両



図4 ロボットの運用上の課題

左：ロボットの洗浄

パネル操作は同様の姿勢で行う必要があり難儀

右：ロボットの設置

波板が無ければロボットを自走させて設置出来る

側には対照区を含めアイガモが放飼される圃場がつながっており、アイガモの活動を促すための湛水が良好に維持されていた。このことから、ロボット走行に伴う水の濁りも良好に維持され、残草調査の結果も極めて良好で、雑草の発生は抑制された。

c) 柳津A (短冊育苗による中苗移植 約950㎡)

例年除草剤による除草が行われており、雑草が少ない圃場であった。移植当時の圃場状態も良好であったが、ロボット除草を行う頃からウキクサが繁茂し、圃場全面が覆われる状況となった。また、除草試験期間中に水源が途絶え水位が極端に落ちた期間もあったが、田面がウキクサで覆われ地表面に日射が入らなかったことで、雑草の抑制も継続され、一部の水生雑草を除き雑草発生量は少なかった。

d) 柳津B (短冊育苗による中苗移植 約1000㎡)

例年除草剤による除草が行われており、雑草が少ない圃場であった。しかし、除草試験期間中に水源が途絶え水位が極端に落ちた期間があり、土壌が露出した際には一気に雑草が発生した。

4. ロボットの実用性評価

除草作業の効率は、1時間あたり約10aであった。また、羽島の試験区は合計約30aであるが、1回の充電で作業が可能であった。ロボットの運搬や、洗浄、充電や保管、メンテナンス等、基本的な機能についてはシーズンを通して問題なく、実用的なレベルに達していると考えられた。ただし、自律走行機能に関しては、条件が整っているときは安定していたものの、浮草の発生時の稲列追従走行や条間隔が整っていない稲列終端出の折り返し動作において失敗する場面があった。また、ロボットの運用に関して下記の課題が挙げられた。

- ・操作パネルが横向きで操作しにくい、LCDが見にくい(図4)。
- ・自律走行のためのパラメータ設定は難しい、スタートボタンだけにしてほしい。

- ・波板は無くしたい(設置が大変、ロボットを波板越しに持ち込むのが大変)。

5. まとめ

今年度の現地実証では、圃場の水管理が徹底して行えなかった事もあり、試験区によっては残草の多い結果となった。圃場の選定や渇水時の対策を整えて水管理を徹底するとともに、株間除草機構についても改良を進めることで、除草効果を高めていきたい。また、ロボットの運用について指摘された課題については、改良機の開発に反映させた。来年度は、改良機を現地実証試験に導入し、実用化に向けた評価をさらに進める予定である。

謝 辞

本研究は、みのる産業株式会社、株式会社常盤電機、岐阜大学、中山間農業研究所、農業経営課、岐阜農林事務所の協力の下、農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の委託を受け実施しました。また、アイガモ稲作研究会、主穂営農には、現地実証試験において多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 農林水産省統計部編：環境保全型農業（稲作）推進農家の経営分析調査報告，(2004)。
- [2] 光井輝彰，小林孝浩，鍵谷俊樹，稲葉昭夫，大場伸也，“アイガモロボットの開発”，日本ロボット工業会機関誌，ロボット177号，pp.20-25，2007
- [3] 光井輝彰，平湯秀和，田畑克彦，飯田佳弘，吉田一昭，岩澤賢治，広瀬貴士，“水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発－現場での実用性評価－”，岐阜県情報技術研究所研究報告，第12号，pp36-37，2011

県産ブランド牛肉付加価値向上のための 携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発(第2報)

田中 等幸 山田 俊郎 大野 尚則 丸山 新* 江崎 雅康** 棚橋 英樹

Development of a Portable Evaluation System for Improving Value-added of Beef Quality (2nd report)

Tomoyuki TANAKA Toshio YAMADA Naonori ONO
Shin MARUYAMA* Masayasu ESAKI** Hideki TANAHASHI

あらまし 和牛肉の肉質は牛枝肉取引規格に従って格付員の目視によって評価されている。近年、オレイン酸などの脂質が口どけの良さや風味に影響することが知られ、和牛肉のおいしさに関する要因の一つとして、脂質を評価する試みが各地で行われている。しかし、枝肉市場に上場される枝肉に対して、客観的かつ定量的に評価するためには、非破壊、簡便かつ迅速に測定可能な小型・軽量の装置でなければならない。そこで我々は、これらの課題を解決するために近赤外カメラを用いた枝肉脂質撮影装置を開発した。本報では、枝肉脂質撮影装置の概要を示し、枝肉市場における実験結果について報告する。

キーワード 枝肉、近赤外マルチバンド画像、脂質評価

1. はじめに

牛枝肉質評価は、牛枝肉取引規格で定められた項目（霜降りの程度、肉の色沢、肉の締まり及びきめ、脂肪の光沢と質）を判断基準として、格付員の目視によって評価されている^[1]。近年、和牛肉のおいしさには、オレイン酸など不飽和脂肪酸（以下、脂質）が関与しており、これらの脂質が占める割合が高いほど、口どけの良さや風味に影響を及ぼすことが知られている^[2]。このような背景から、従来の肉質評価に加えて、オレイン酸等の良質な脂質成分も評価しPRすることで、地域ブランド牛肉の付加価値化に向けた新たな取り組みが各地で行われている。しかしながら、目視によって脂質の成分的な差異を判別することは困難である。従来から脂質などの成分を測定し評価する方法は、ガスクロマトグラフ等の理化学的測定装置による破壊試験である。破壊試験は分析精度が高い半面、分析の際には枝肉の商品価値を損失し、手間と時間を必要とする課題がある。そのため、枝肉市場における評価方法としては適用できていない。最近では、近赤外分光法の技術を応用した光ファイバ方式の脂質推定装置が実用化されている。この装置は非破壊に測定できる利点を有しているが、スポット測定であるため枝肉

面全体に広がる脂質を評価することは困難である。

そこで我々は、近赤外分光法の技術をカメラによる画像測定に応用し、非破壊かつ客観的に枝肉ロース芯面の脂質を評価する可視化技術を開発した^[3]。平成22～23年度には総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)」の委託研究を受け、非破壊に枝肉に含まれる脂質を平面的に評価し、生産者等、畜産関係者にその情報をフィードバックするシステムを開発した^[4-7]。

本報告では、枝肉市場において利用可能な枝肉脂質撮影装置（以下、撮影装置）の解説と、本装置を用いた撮影実験結果について報告する。

2. 近赤外画像を用いた脂質成分の可視化

分光反射特性は物性の成分情報を表しており、特に近赤外帯域においては、農産物の成分に特徴的な反射特性を示すことが知られている^[8-9]。本研究では、牛肉に近赤外光を照射し、肉表面で反射される反射光と、肉内部に入り込んで出射する散乱光の反射強度をカメラによって観測する。したがって、拡散反射率に変化を及ぼす近赤外光吸収の原理をカメラ開発に応用することが本研究の目的である。

我々はこれまでの研究から、近赤外帯域における比反射率と不飽和脂肪酸割合との関係には負の相関があることを実験的に確認し^[10]、牛脂の近赤外帯域（750nm～

* 岐阜県畜産研究所

** 株式会社イーエスピー企画

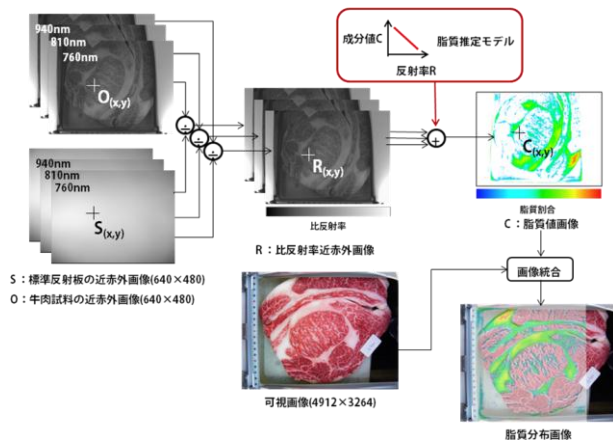


図1 オレイン酸割合分布画像作成フロー

1000nm)における拡散反射スペクトルの特徴として、760nm付近および、930nm付近にCH結合に由来する吸光帯があることを確認した。さらに、中心波長760nm、800nmおよび、930nmから成る近赤外マルチバンド画像を用いて、(1)に示す脂質推定モデルを構築し、脂肪領域の比反射率(標準反射板の反射強度に対する脂肪領域の反射強度)から理化学的測定装置によって測定される脂質割合を推定する手法を開発した^[7]。

$$c = k_0 + k_1 R_{\lambda 760\text{nm}} + k_2 R_{\lambda 800\text{nm}} + k_3 R_{\lambda 930\text{nm}} \quad (1)$$

ここで、 c は脂質推定値[%]、 R は波長 λ における標準反射板に対する反射率、 k は波長 λ における係数である。なお、脂肪はオレイン酸、リノール酸など多くの脂質から構成されるが、脂質推定値 c とは、各脂肪酸が総脂肪酸に占める割合を意味する。本報告では脂質のうちオレイン酸を対象とし(以下、オレイン酸割合)、この値が大きいほどロドけや風味が良いとされる。

図1に近赤外マルチバンド画像からオレイン酸割合を可視化する画像(以下、オレイン酸分布画像)の作成フローを示す。オレイン酸分布画像の作成には枝肉試料と標準反射板それぞれの近赤外マルチバンド画像を使用する。標準反射板は、全波長光に対して同一の反射強度を返す特性をもっている。その特性を利用し、波長間におけるカメラ感度や、レンズの透過特性の違いを一定とする。また、照明ムラを解消するフラット補正としても使用する。枝肉の画像 $O(x, y)$ と標準反射板の画像 $S(x, y)$ を入力とし、同一波長の近赤外マルチバンド画像ごとに対応する座標値 (x, y) 間で除算し、比反射率画像 $R(x, y)$ を作成する。次に、理化学的測定装置によって測定したオレイン酸割合実測値と、比反射率画像における脂肪領域の平均反射率との関係式(脂質推定モデル(1))によってオレイン酸割合推定値画像 $C(x, y)$ を作成し、値に応じて疑似カラーをマッピングする。オレイン酸割合推定画像の各画素にはオレイン酸割合の推定値(非整数値)が数値

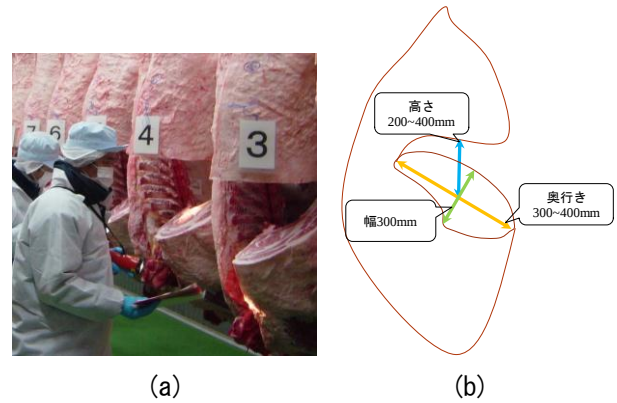


図2 枝肉評価の様子(a)と牛枝肉のサイズ(b)

化されている。さらに、可視画像とオレイン酸割合推定画像を幾何変換によって統合することで、可視画像における平面的な脂質割合分布の把握が容易となる。

3. 枝肉脂質撮影装置

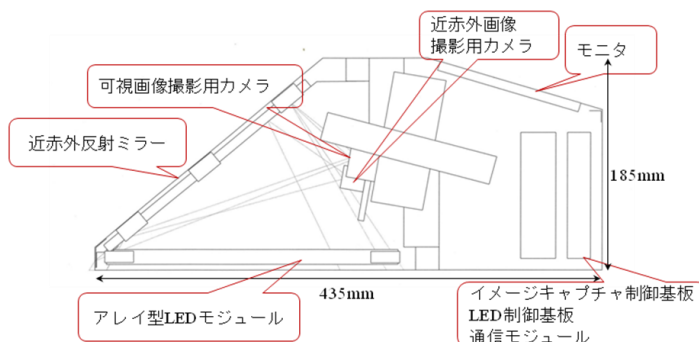
3. 1 撮影装置の設計

これまでの実験に用いた撮影装置は、据え置き型の近赤外カメラと液晶チューナブルフィルタで構成しており、冷暗室内でハロゲン光を牛肉試料に照射しながらバンドパスフィルタの切り換えによって近赤外マルチバンド画像を取得していた。つまり、撮影装置の運搬は困難であること、また外乱光の影響を受けない暗室環境で撮影する必要があることから、この構成を枝肉市場に持ち込んで利用することはできない。そこで、同等の画像を撮影する機能を持つ可搬式の装置を開発するため、持ち運びが可能な小型近赤外カメラを使用し、液晶フィルタとハロゲン光の代わりに中心波長の異なる複数のLED照明を連続的に切り換えて撮影が可能な小型暗室環境型の撮影装置を設計する。

図2に岐阜県内に在る枝肉市場の様子と、枝肉のサイズを示す。枝肉市場内は、4℃程度、湿度70%程度の恒温環境で衛生的に管理されている。枝肉の取り扱いは、破壊はもちろん接触、発熱によって損傷してはならない。また、枝肉は300~400mm間隔に密に吊り下げられており、1回の市場に上場される枝肉は100~200頭である。このため、撮影には迅速性が求められること、また格付員や衛生職員などの作業を妨害してはならないことが挙げられる。このような状況から、撮影時の効率性、操作性および、操作者の作業負荷軽減を図るために、撮影装置は持ち運び可能な小型・軽量な形態である必要がある。また、枝肉1個体の撮影に許容される時間は30秒以内と試算した。枝肉は胸椎が完全に切断されており、開口面幅300mm、開口奥行き300~400mmおよび、開口高200~400mmである。したがって、撮影装置は開口部に挿入可



(a) 装置外観



(b) 装置構成

図3 枝肉脂質撮影装置

能であり、枝肉断面の中心領域200mm×200mmを撮像する画角が必要である。以上に挙げた課題の解決を検討した撮影装置について次節で述べる。

3. 2 撮影装置の試作

図3に試作した枝肉脂質撮影装置の外観と装置構成を示す。撮影装置は、近赤外画像撮影用カメラ、可視画像撮影用カメラ、イメージキャプチャ制御基板、LED制御基板、通信モジュール、アレイ型LED照明、ディスプレイモニターおよび、近赤外反射ミラーによって構成される。撮影時の照明環境を一定とするため、カメラ等撮影関係部品はアルミケースで覆った。これにより、筐体内は暗室環境となり、単一波長光を投光することで、任意波長の近赤外マルチバンド画像が取得できる。

撮影の際、枝肉の切開部の開口高が狭いため、カメラ光軸を鉛直下向き方向にしてロース芯領域を包含する画角を確保することは困難である。そのため、ミラーを用いた間接撮影方式を採用し、撮影装置の形状は、筐体の高さを出来るだけ低く、なお且つ開口部に挿入可能なくさび型形状とした。この結果、装置サイズは230×435mm、高さ185mm、総重量は約4kg（バッテリーを除く）となった。

次に、装置部品について述べる。可視画像撮影用カメラは高解像度の撮像素子（4912×3264）を使用した。近赤外画像撮影用カメラは700～1000nmの近赤外帯域に高感度の撮像素子（640×480）を使用した。可視画像撮影用カメラと近赤外画像撮影用カメラによって撮影されるロース芯の領域が、画像の中心付近となるようにカメラの画角を調整した。照明は小型、低消費電力で発熱による枝肉への影響が少ないLEDを使用した。装置筐体底面の両脇にアレイ型のLEDモジュール2式を配置し、モジュール内には白色LEDと3波長（760nm、810nmおよび940nm）の近赤外LEDを交互に配列した。また、筐体内部は拡散板を取り付け、LEDモジュールは、照明ムラが

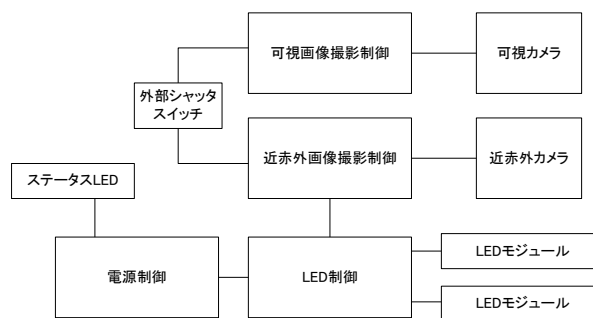


図4 制御ブロック図

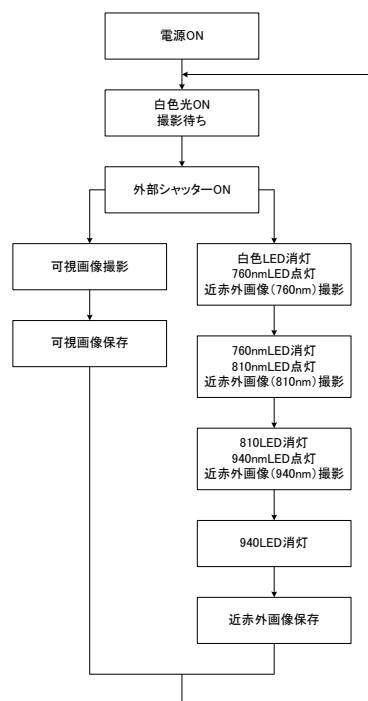


図5 撮影制御シーケンス



図6 撮影実験の様子

できるだけ小さくなるように放射方向を調整した。この結果、ロース芯全体に間接光が照射される拡散反射環境を構築した。

その他、撮影装置はバッテリー駆動とし、撮影した画像は無線送信できる機能をもたせた。また、衛生面の配慮から枝肉との接触部分をできるだけ最小限とするため、着脱可能な接触バーを底面に取り付け、撮影終了後は接触バーの洗浄を可能とした。

図4に制御ブロック、図5に撮影制御シーケンスを示す。撮影制御シーケンスは、撮影装置の電源をONすると、白色LEDが点灯し撮影待ち状態となる。外部シャッタースイッチを押下すると、シャッター信号が可視、近赤外の各画像撮影制御に送信され、可視画像と近赤外マルチバンド画像が記録される。この時、LED制御と近赤外マルチバンド画像制御は連動し、白色光、760nmのLED、810nmのLED、940nmのLEDの順にシーケンシャルに点灯・消灯が繰り返され、最終的に可視画像1枚と3chの近赤外マルチバンド画像1枚が保存される。

4. 枝肉脂質撮影装置の評価

4. 1 枝肉市場における撮影装置の動作検証

冷温・高湿度環境下での撮影装置の動作を検証するため、枝肉市場にて撮影実験を実施した。撮影実験の様子を図6に示す。作業者は白色LEDが点灯した状態でディスプレイを見ながら、ロース芯の中心に撮影位置を合わせた後、ハンドル脇のシャッタースイッチを押下することで、可視画像および近赤外マルチバンド画像を記録する。撮影および記録の状態はステータスLEDにて確認できる。牛1個体あたりに要する時間は、撮影に約2秒、画像記録に18秒、トータル20秒であった。撮影時間は当初の想定30秒を満足したが、更なる時間短縮が必要である。

4. 2 撮影装置の脂質推定結果の検討

本撮影実験では枝肉33個体を撮影した。撮影実験と並行してロース芯表面の脂を採取し、高速液体クロマトグラフ（島津製作所社製、LC-10）によって理化学的測定

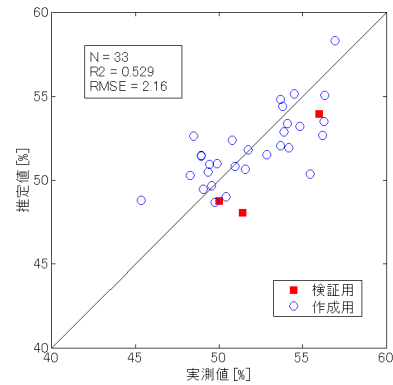


図7 理化学測定値と脂質推定値の散布図

を行った^[11]。採取した脂0.5 g を15 ml の試験管に秤量し、25%水酸化カリウムエタノール溶液5mlを加え、90℃で2時間加熱し鹸化した。試験管に水6mlを加えた後、n-ヘキサン15mlで脂質を除去した。水層を塩酸にて酸性にし、n-ヘキサン10mlを加え、1分間振とう抽出した。ヘキサン層を採取し、窒素ガス気流下40℃で乾固後、0.05mol/Lフェナシルプロマイド100 μl、トリエチルアミン100 μl、エタノールを加えて2mlとした。60℃で2時間加熱しフェナシルエステル化し、高速液体クロマトグラフ用試料とした。高速液体クロマトグラフはカラム（Shim-pack FC-ODS 75mmL.×4.6mmI.D.）、移動相にpH2.6の0.01mol/L リン酸塩緩衝液/アセトニトリル（20:80, v/v）を用いて測定波長254nmで脂肪酸組成を分析した。同定した脂質はミリスチン酸、ミリストレイン酸、パルミチン酸、パルミトレイン酸、ステアリン酸、オレイン酸および、リノール酸であり、総脂肪酸に占めるオレイン酸をオレイン酸割合とした。

脂質推定精度の検討および、撮影装置によって取得した近赤外マルチバンド画像からオレイン酸分布画像が適正に作成されるかを確認した。脂質推定モデルの作成は、統計解析ソフトウェア（Addinsoft, XLSTAT）を用いて、目的変数を理化学的測定値（オレイン酸割合）、説明変数をロース芯表面の脂肪領域における比平均反射率とする重回帰分析によって推定式を求めた。脂質推定モデルは30個体を用いて推定式を作成し、未知の3個体によって検証した。脂質推定モデルは式(2)となった。760nm、940nmの係数がともに負であること、また940nmの係数が他の係数に比べて大きいことから、CH結合に対する吸光係数の知見と合致し、脂質推定モデルは適当であると考えられる。

$$c[\%] = 113.8 - 49.6 \times R_{\lambda 760\text{nm}} + 109.7 \times R_{\lambda 810\text{nm}} - 152.9 \times R_{\lambda 940\text{nm}} \quad (2)$$

撮影装置によって取得した画像の脂質推定精度を評価するには、ロース芯面の画素単位で理化学的測定を行い、

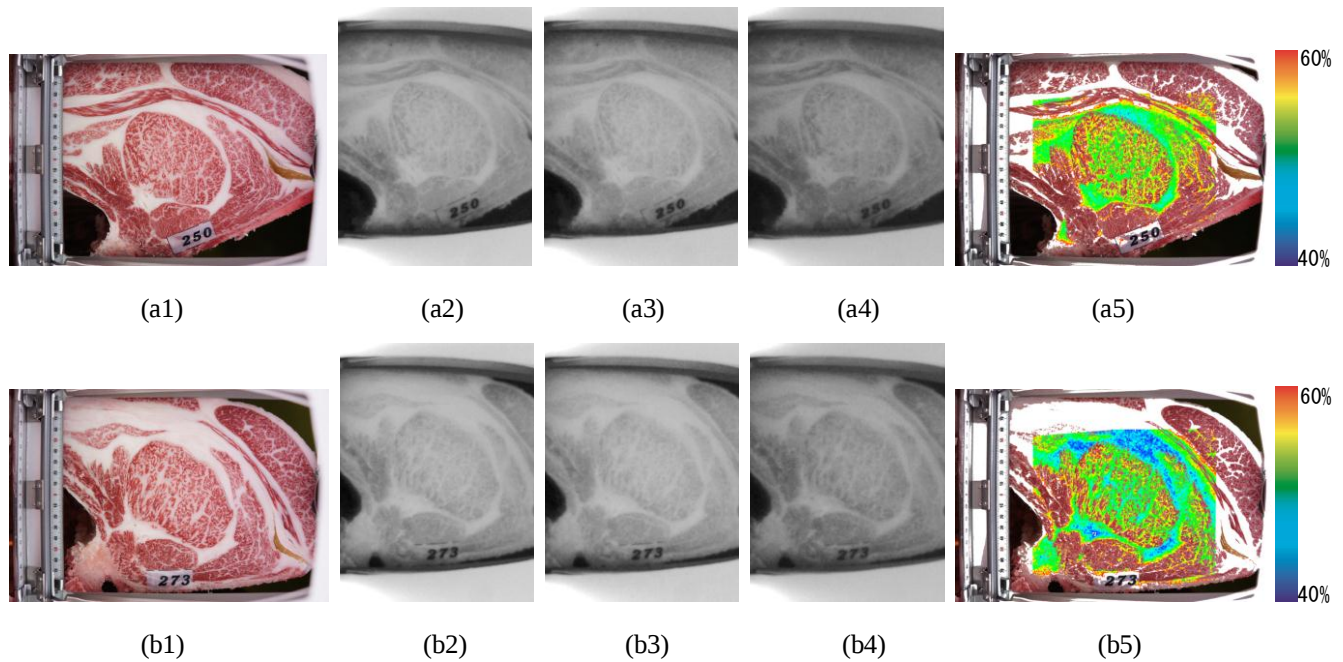


図8 枝肉脂質撮影装置による撮影画像と脂質分布画像

(a1, b1) 可視画像

(a2, b2) 近赤外画像 760nm, (a3, b3) 近赤外画像810nm, (a4, b4) 近赤外画像940nm

(a5, b5) オレイン酸分布画像

推定値との差によって評価する必要がある。しかし、画素単位で理化学的測定を行うことは物理的に困難である。そこで、ロース芯面の理化学的測定値と画像の脂肪領域の平均比反射率との関係から精度を検証する。脂質推定精度は決定係数 R^2 および、平均誤差RMSEによって評価した。図7は撮影に成功した33個体の理化学測定値（オレイン酸）と推定値の散布図である。決定係数 $R^2=0.529$ 、推定誤差RMSE=2.16の結果が得られた。シーケンシャルに近赤外マルチバンド画像を取得する今回の撮影方式は、時間的なズレが発生するため、枝肉の表面温度変化や近赤外マルチバンド画像間の位置誤差によっては、脂質推定結果に著しい影響を及ぼすことが予想された。しかしながら、従来の脂質推定精度^[6-7]とほぼ同等の結果が得られたことから、温度変化や近赤外マルチバンド画像間の位置誤差による影響はほとんどなかったと考えられる。

図8は、2つの試料について、撮影装置によって取得した可視画像 (a1, b1)、近赤外マルチバンド画像 (a2~a4, b2~b4) とオレイン酸分布画像 (a5, b5) の例である。オレイン酸分布画像は可視画像とオレイン酸推定画像との幾何変換による統合結果であり、可視画像の脂肪領域に位置するオレイン酸割合を可視的に表現したものである。オレイン酸割合40%を青色、60%を赤色に割り当て、青色から赤色に変化するに従って、オレイン酸割合が段階的に高くなることを示している。なお、キャリブレーションパターンを用いたコーナ20点の平均統合誤差は

3.68pixelであった。

図8(a), 図8(b)に示した試料の理化学的測定値はそれぞれ、55.5%, 45.4%であり、理化学的測定値とオレイン酸分布との関係が相対的に一致した。特に、筋間脂肪の領域において著しい差が確認できる。

5. まとめ

本研究では、生産者や畜産関係者に脂質情報を提供し、育種改良および飼養技術の改善に導く新たな脂質評価システムの実現を目指している。本報告では、枝肉市場で利用可能な枝肉脂質撮影装置について、設計方針と試作した撮影装置の構成および撮影制御シーケンスを述べた。枝肉市場において、試作した撮影装置による撮影実験を実施し、基本的動作の確認と理化学的測定値の異なる個体を用いた画像比較によって差異を示した。

理化学的測定装置による脂質評価は、破壊試験であるため、枝肉市場において適用することは困難である。本撮影装置は、非破壊かつ迅速に評価が可能であることが最大の特徴であるとともに、枝肉ロース芯面全体としての評価が可能となる。また、成分の吸光現象に基づく適切な波長光を選択することで、他の食品成分の評価にも応用が可能である。

今後、枝肉市場における実験データを蓄積し、精度評価を行うとともに、枝肉切開面における脂質分布の解明

が課題である。生産者などに対して、客観的かつ定量的な情報をフィードバックすることによって、地域ブランド牛肉の付加価値化に向けた取り組みに拍車がかかることが期待される。

謝 辞

本研究は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE) 地域ICT 振興型研究開発「県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発」で実施しました。ここに感謝の意を示します。

文 献

- [1] 社団法人日本食肉格付協会 <http://www.jmga.or.jp/>
- [2] David B. Westerling and H. B. Hedrick: Fatty Acid Composition of Bovine Lipids as Influenced by Diet, Sex and Anatomical Location and Relationship to Sensory Characteristics, Journal of Animal Science, Vol.48, pp.1343-1348, 1979.
- [3] 田中等幸, 丸山新, 棚橋英樹: “近赤外画像を用いた和牛肉のロース芯内オレイン酸分布測定法”, 肉用牛研究会報, Vol.91, pp.2-7, 2011.
- [4] 田中等幸, 山田俊郎, 大野尚則, 江崎雅康, 丸山新, 棚橋英樹: “枝肉脂質撮影装置の開発”, 第12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論文集, pp.2139-2142, 2011.
- [5] 田中等幸, 山田俊郎, 丸山新, 江崎雅康, 棚橋英樹: 県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発, 岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol.12, pp.19-22, 2010.
- [6] 田中等幸, 丸山新, 山田俊郎, 江崎雅康, 棚橋英樹: “近赤外カメラを用いた携帯型牛肉脂質評価端末の開発 - 機能モデルの開発と評価 -”, FIT2011 (第10回情報科学技術フォーラム) 論文集, pp.297-300, 2010.
- [7] 田中等幸, 丸山新, 山田俊郎, 江崎雅康, 棚橋英樹: “牛肉脂質測定装置のためのマルチスペクトル画像解析モデルの設計と評価”, 第11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論文集, pp.2182-2184, 2010.
- [8] 尾崎幸洋, 河田聡: “近赤外分光法”, (株) 学会出版センター, pp.157-172, 2008.
- [9] 岩元, 河野, 魚住: “近赤外分光法入門”, 幸書房, pp.40-61, 2002.
- [10] 田中等幸, 平湯秀和, 丸山新: “画像を用いた食品評価に関する研究 (第2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol.10, pp.54-57, 2008.
- [11] Borch RF.: “Separation of long chain fatty acids as phenacyl esters by high pressure liquid chromatography”, Analytical chemistry, Vol.47, No.14, pp.2437-2439, 1975.

身体障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第3報)

— スマートフォンによる電動車いすの運転操作 —

藤井 勝敏 水野 渚 遠藤 善道

Remote Control of the Electric Wheel Chair using Smartphones

Katsutoshi FUJII Nagisa MIZUNO Yoshimichi ENDO

あらまし スマートフォンの無線通信機能を利用して電動車いすを遠隔操作するシステムを開発した。通信にはBluetoothおよびWi-Fiを用い、電動車いす側には通信モジュールを搭載し、スマートフォン用に専用アプリを開発することによって、走行操作および車いす搭載の小型ロボットアームが操作できることを確認した。

キーワード 福祉機器, 電動車いす, スマートフォン, Bluetooth, Wi-Fi

1. はじめに

電動車いすに代表される移動支援機器や家電製品を制御する環境制御装置などの福祉機器は、身体障がい者の快適な自立生活を支援するために広く利用されている。これらの機器を操作する際は、各利用者の身体条件に合わせたセンサー、スイッチ、コントローラ等を選定し、微少な身体動作で装置の動作指示ができるようになっていく。しかし、操作したい機器の数が増えれば、機器ごとに固有の操作方法があり、それぞれの学習負担や、実際に操作するときの手間が増加するため、新しい便利な機器を導入することでより快適な自立生活を目指すには限界がある。

ところで、昨今の携帯電話機(スマートフォン)は高性能な上に、必要に応じて追加アプリを導入することで新機能を獲得することができる上に、使用方法の学習コストについては、パソコンへの新規ソフト導入と比べて極

めて軽減されている。これは、アプリの使い方など使用上必要な情報が適時タッチパネル面上に提示されるため、事前に説明書を理解するまでもなく、望む機能を指先で触れるだけという明快なユーザインタフェースによるものと言える。

そこで本研究では、スマートフォンの直感的なユーザインタフェース機能を応用し、電動車いすや環境制御装置の利用者の心的負担が少ない操作入力システム(図1)を実現するため、必要な技術的要件について検討の上、試作と通信実験を行ったので報告する。

2. スマートフォンとの無線通信

スマートフォンを電動車いすのユーザインタフェースに用いるためには、既製品であるスマートフォンに対応した通信機能を電動車いすに組み込むことと、受信した信号を電動車いす制御システムに入力する必要がある。このうち、外部信号から電動車いすを制御する部分については既報^[1]のとおり組み込み済みである。

そこで、本研究実施時点において国内で発売されているスマートフォンに広く採用されている各種の近距離無線通信機能について検討した。

2. 1 Bluetooth

Bluetoothは、比較的近距離(10m程度内)にある機器との間で無線通信を行う通信方式である。スマートフォンでの利用は、ワイヤレスヘッドセットマイクや無線キーボード・マウスなど外部機器との通信や、スマートフォン同士での情報交換などに用いられる。

電動車いす側への組み込みには既製品の通信モジュール(ADCテクノロジー製ZEAL-C01)が利用でき、電源および装置側とのシリアル通信回路を付加するだけで容易に



図1 スマートフォンによる電動車いすの遠隔操作

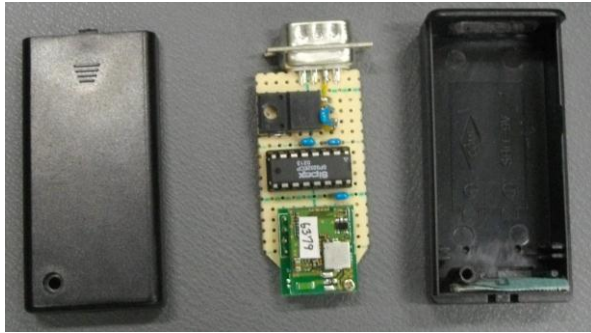


図2 Bluetooth通信モジュール実装基板

実装できる(図2)^[2]。スマートフォンとの通信に際しては事前にペアリングと呼ばれる相互認証手続きを済ませれば、自作アプリから自動で電動車いす側通信モジュールと接続できる。

Bluetoothは多くのスマートフォンや過去の携帯電話にも搭載されているが、接続可能な対象機器(プロファイル)は機種、端末のOSによって制限されている場合がある。特に、組込み機器との通信に使うSPPプロファイルについては、iPhone、iPadなどのiOS搭載端末で本稿執筆時には利用できなかったため、次節の方法を検討した。

2. 2 Wi-Fi

Wi-Fiは、無線LANに利用される通信方式であり、通信インタフェースは一般的なノート型PCにも搭載されている。また、公共施設や家庭内などにアクセスポイントが設置されていることも多く、無線通信規格としては一般的なもので、多くのスマートフォンに標準搭載されている。iOS端末で動くアプリからも利用できる。

電動車いすをWi-Fiネットワーク経由で制御するためには、やはり既製品の無線LAN組込みモジュール(WIZnet製 WIZ610Wi)を利用して無線通信回線を確立し、制御コマンドを車いす側のシステムに入力した(図3)^[3]。ただし、電動車いすを既存の無線LANのクライアントに設定すると、そのアクセスポイント内でしか行動できず実用的でないため、電動車いす側モジュールをアクセスポイントモードに設定した。

なお、車いすの操縦を許可するスマートフォンは、WEPやWPAなど、無線LANのセキュリティ設定で利用される様々な暗号化方法で限定することが出来る。遠隔操



図3 Wi-Fi通信モジュール実装基板

作の乗っ取りを防止するためには、デフォルト設定ではなく、ネットワーク管理者が個別に設定を行うことが重要である。

3. 電動車いすの遠隔操作アプリ

筆者らの電動車いすは、様々な発想の外部操作機器を接続できるように、標準操作レバーのほかにシリアルポートから操作コマンドを受け付けるように改造している(図4)。このポートに無線通信モジュールを接続し、スマートフォン等から適切な操作命令コードを適時送信すれば動作する仕様である。そこで、スマートフォンの機能を活用した遠隔操作アプリを開発したので報告する。

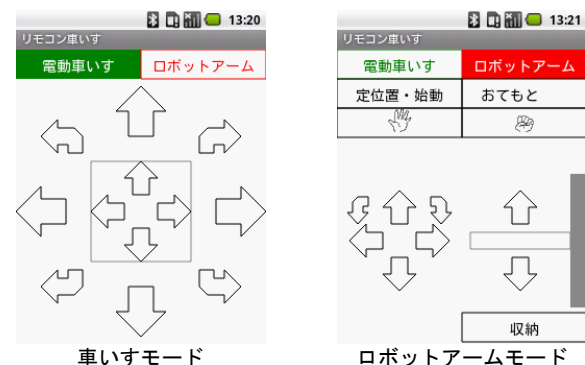


図5(a) Android版電動車いす操作アプリ

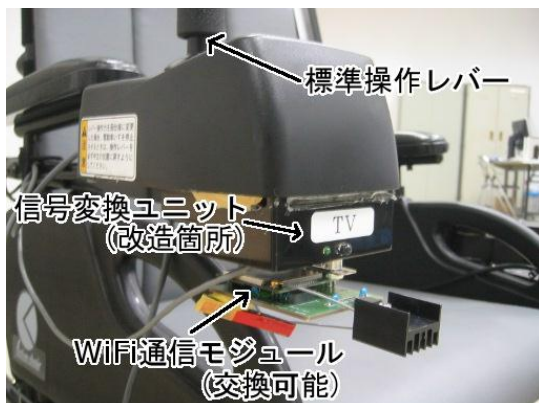


図4 通信モジュール設置例



図5(b) iPhone版電動車いす操作アプリ



図6 標準レバーでのアーム操作方法



図7 加速度センサ式コントローラ

3. 1 タッチパネル式操作アプリ

タッチパネル画面上に車いすの移動方向を矢印で表示し、押した矢印に応じて車いすが走行するアプリを開発した。また、タッチパネル操作によりいつでもロボットアームの操作画面に切り替えることができる。Android版の画面を図5(a)、iPhone版を図5(b)に示す。

両者にはBluetooth通信かWiFi通信かの違いがあるが、所望の操作をタッチしている間動作する操作方式に差異はない。また、スマートフォンのような小型の機器だけではなく、タブレットタイプの機器でも同じように使用することができる。

ロボットアームの操作については、標準操作レバーを使う従来の操作方法では、適切な動作指示を出すためには独特なレバーの倒し方(図6)を覚える必要があったが、本アプリを使えば機能が画面上で確認できるため、初心者でも間違いなく操作することができる。

3. 2 加速度センサ式操作アプリ

スマートフォンの加速度センサを応用した操作アプリを試作した(図7)。タッチパネルに触れながら端末本体を傾けると、傾倒方向に応じて前進、後退、旋回し、タッチパネルから手を離せば停止する。タッチパネルに触れた瞬間以降の傾斜センサのX,Y加速度検出値の変異量をレバーの傾倒量に対応させる仕組みになっている。

このアプリの特徴は、タッチパネル画面を見ずに直感的に操作できる点であるが、実際にこの操作方法で車いすを操作するには、上肢および手首が十分健全であることが要求され、その上である程度の訓練が必要である。

また、このような特殊な操作方法がアプリのプログラミングだけで容易に実現することは、スマートフォンを利用するメリットの一つである。過去に組み込み用加速度センサを利用して本アプリと同様な運転操作を行うハンドル型コントローラ(図7左)^[4]を試作したが、今回は製作に要する費用や時間が大幅に削減できた。

スマートフォンには傾斜センサ以外にも様々なセンサ類が搭載された機種が存在するため、今後もアイデア次第で様々な操作方式を開発することが可能である。

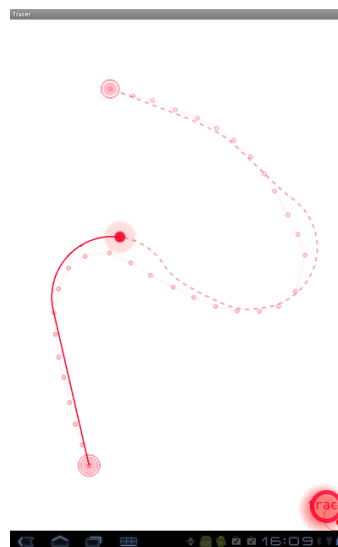


図8 Tracer

3. 3 ライントレース式操作アプリ

一般的に人が操作する車両では、運転者はリアルタイムに状況を判断し、適切な操作を与えることが要求され、当然、車両側は操作入力に応じて即時動作する応答性が期待される。ところが電動車いすのユーザに関して言えば、この前提の内、運転者の状況判断能力および操作技能について十分でない場合を想定しなければならない。そこで、リアルタイムに車いすを操縦するのではなく、あらかじめタッチパネル上で所望の移動経路を設定し、その経路設定に沿って電動車いすを走行させ、必要に応じていつでも停止させることができる操作方式のアプリ "Tracer" を試作した(図8)。

このアプリは、運転者がタッチ画面上に自由に線を描くと、その曲線に可能な限り沿った車いすの走行経路予想図を計算し、重ねて提示する。提示された曲線経路で走行してよければ、右下のTraceボタンをタッチすると、連続して自動運転を行う。タッチパネルから指を離せばいつでもその場で停車する。

計算された経路予想図を見て、必要なら経路の書き直しや継ぎ足しが可能である。希望する経路全体を一筆で



図9 起動計算パラメータ設定画面

描ききれないユーザは、継ぎ足し入力によって所望の経路を作成できるように配慮している。

もし描かれる線に直角ターンなど電動車いすでは物理的に無理な経路が含まれていても、計算される走行経路予想曲線は、直線と円弧を組み合わせた電動車いす用の走行制御信号として生成される。その場合、描いた線から大きく外れた軌道が生成されることがあるが、その場合はユーザの試行錯誤により調整を繰り返す中で、電動車いすの動作特性を理解することが求められる。

タブレット上の曲線と実際の走行経路の縮尺や、操舵角についても、車椅子の挙動を見ながら使用中に調整する必要がある。その場合、図9の設定画面を表示して、アプリ側の経路計算パラメータを変更して調整することになる。

4. まとめ

無線通信機能を持った小型の普及型装置であるスマートフォンを応用し、電動車いすシステムの新しい操作方式を実現する方法について研究を行った。

まず、無線通信により電動車いすが操作可能になったことで、電波が届く範囲内であれば、無人の車いすを遠隔操縦できるため、電動車いすを移動手段としての用途だけではなく、遠隔作業用ロボットとしての応用可能性がある。またその場合、車いすの運転とは操作方法が全く異なっても、タッチパネル上に操作方法を提示できるため、混乱することなく両者の使い分けが可能である。

また、スマートフォン上で動作するアプリは比較的簡単に開発・改良が行えるため、従来にない新しい発想の操縦方法を手軽に試すことができる。この特徴は、個人ごとの調整・カスタマイズが必須とされる身体障がい者向け福祉機器において非常に期待できる。今後、ユーザ、福祉機器メーカー、アプリ開発者の三者間でのニーズや情報の共有が進むことで、より高度な自立支援につなが

る福祉機器が実現することを期待し、本研究の結びとする。

なお、本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成23年度福祉用具実用化開発助成金により実施したので、ここに感謝の意を表する。

文 献

- [1] 藤井勝敏, 千原健司, 稲葉昭夫, “身体障害者のQOLを大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発—多機能指示端末の設計製作—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第8号, pp.57-60, 2007.
- [2] 無線化 .com BluetoothSPP モジュール ZEAL-C01, <http://www.musenka.com/bluetooth/c01.html>
- [3] WIZnet製品情報, <http://www.wiznet.co.kr/>
- [4] 藤井勝敏, 千原健司, “身体障害者のQOLを大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発—多様な走査装置の開発—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第10号, pp.11-14, 2009.

身体障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第4報)

— 電動車いす用操作機器によるスマートフォン操作 —

藤井 勝敏

田畑 克彦

遠藤 善道

Operating Smartphones using Controllers of the Electric Wheel Chair

Katsutoshi FUJII

Katsuhiko TABATA

Yoshimichi ENDO

あらまし 手や指を使わずにスマートフォンのタッチパネルを操作することを目標に、重度身体障がい者向けに開発した電動車いすの運転用操作入力装置を応用してXYプロッタ型システムを操作する方法を検討した。試作したシステムは、タッチパネルの任意の位置をポイントし、タッチペンの接触、非接触を制御できるが、その操作には電動車いす用に開発した各種コントローラがそのまま利用できるようインタフェースを共通化した。さらに、ヘッドレスト式コントローラによって快適に操作できるよう操作方法の改良を行った。

キーワード タッチパネル, XYプロッタ, 電動車いす用コントローラ

1. はじめに

スマートフォンに代表されるタッチパネル型デバイスは、近年急速な発展と普及が進んでいる。このデバイスの特徴は、「高機能でありながら直感的に操作可能」「小型で持ち運びが可能」「あらゆるニーズに対応する膨大な数のアプリが入手可能」「いつでもどこでもネットワークに接続可能」など、現代生活を快適に暮らすために有効であると考えられる。また、このデバイスは身体障がい者の支援目的での利用可能性についても注目を集めており、全国の各種機関で盛んに研究や普及事業等が行われている。

このように非常に便利な機器ではあるが、基本的に手先が健全な人向けのツールであるため、本体の把持やタッチパネルの操作ができない場合、介助者の支援を得ずに自分で操作することは困難である。しかし、身体障がい者の自立生活の質の向上におけるスマートフォンの重

要性は高まると予測されることから、当研究所がこれまでに電動車いすの操作方法について行った研究成果を応用して、重度身体障がい者がスマートフォンを操作する手段について研究を行ったので報告する。

2. システムの構成

本研究では、既製品のタッチパネル型デバイス(iPod touch)に対して、ユーザの操作量相当の信号を与えて論理的にアプリを制御するのではなく、タッチパネルに物理的に接触することにより操作を行う手法を採る。これは、スマートフォンの機能は単に高機能な通信端末というだけではなく、ユーザが触れたときに画面や音、振動により反応すること自体を楽しむことにもあると考えているためである。また、この手法であれば、iPod以外のタッチパネルデバイス(Android端末等)にも適用できる可能性がある。

従って、手や指を使わずにiPodを操作する手段として、機械的な装置により物理的にiPodに作用する装置を、頭部などの残存身体機能によって操作する方法を検討する。今回、図1に示すとおり、2軸のスライダーとペン先の上下機構から構成されるXYプロッタおよびその制御システムを試作した。

2. 1 XYプロッタ部

本装置は、iPodを装着するための窪みを空けた樹脂材料(POM)製の台座と、画面上にタッチペンの位置を合わせるスライダー2軸で構成されている。なお、iPodの画面全体の任意の位置をポイントするとともに、ユーザが画面全体を確認する際には視界を遮らない位置に退避で



図1 XYプロッタシステム

きるよう有効ストロークが120mmおよび90mmのステッピングモータ駆動式スライダ2台を直交させて台座に設置した。

2. 2 タッチペン駆動部

画面への接触は、市販のiPhone(iPod)用タッチペンで行う。タッチペンの固定具をソレノイドとバネによる機構により、電気的な制御でiPod画面表面に対して2mm程度着脱させている。

2. 3 制御システム部

外部の操作入力装置から受信した操作信号をもとに、ステッピングモータ2軸とソレノイドを、マイコン(PIC16F88)で制御している。接続可能な操作入力装置は、当研究所でこれまで電動車いす用に開発した各種コントローラがいずれも使用できるよう、コネクタ形状、ピン配置および通信プロトコルを共通にしている。

3. 操作方法

前述のとおり、このXYプロッタシステムは当研究所の電動車いす用コントローラを使って操作することができるが、これらのコントローラに共通して、

- ・ 前進/後退速度指令値
- ・ 左右旋回角度指令値
- ・ 車いす/ロボットアーム切替信号

の3種類を搭乗者の操作に応じて信号出力を行う仕様になっている。

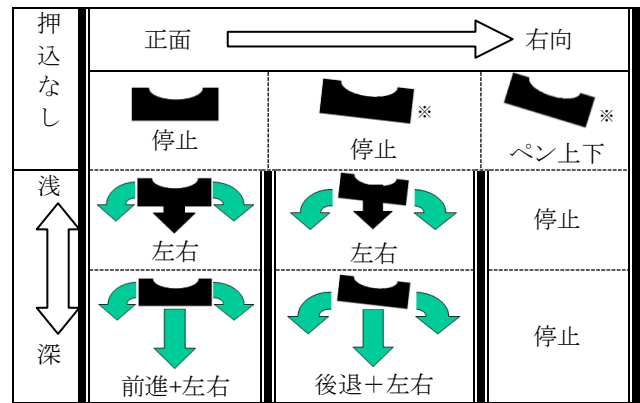
XYプロッタは、この信号を各軸の移動速度およびソレノイドの通電・遮断切り替えに対応させることで、画面に対して前後・左右のペン先移動と、タッチペンの上下を制御可能としている。そのため、ユーザが身体条件等に合わせて使いやすい電動車いす運転装置を選べば、それを使ってXYプロッタ操作も同様に行うことができる。

3. 1 ヘッドレストコントローラの改良

この装置の対象ユーザは、手でiPod等を保持し指先で操作することができない身体障がい者である。従って、その入力装置も手を使わないものが求められる。そのため、これまでに頭部の動きをヘッドレストで検出して電動車いすを運転する操作方法を提案し、試作モデルを開発している^[1]。

この入力装置では、頭部の左右の動きで旋回方向を指定し、ヘッドレストに頭を押し付けると押し込み量に応じて前進速度が指令される。後退する場合は、ヘッドレストとは別に設置する押しボタンを使い、後退モードに切り替える。また、車いす/ロボットアームの切り替えは、そのボタンを長く押し続けることで行う。

この操作割り当てをそのままXYプロッタに適用することもできるが、車いすの運転と異なり、前後方向の切り替えが頻繁に発生するため、押しボタン操作が煩雑になる。そこで、押しボタンを使わずにヘッドレストで前



※ 入力は左右対称。破線間で状態遷移可

図2 ヘッドレストによる操作方法

後方向選択とペン先上下のためのモード切替を含めた図2の入力方式を開発した。これにより、スムーズに位置あわせおよびペン先操作が可能となっただけでなく、電動車いすの運転操作においてもボタン操作が不要となった。

4. まとめ

重度の身体障がい者が電動車いすを運転するための技術的アプローチを応用し、身体によるタッチパネル操作が困難な場合にスマートフォン等のタブレット型デバイスを操作する方法について検討を行った。頭部の動きをヘッドレスト型コントローラで検出し、XYプロッタ式の機構によりスマートフォン画面の任意の位置に接触および離脱が可能であることを確認した。

ただし、今回試作したXYプロッタシステムではタッチペンが画面に触れても、iPodにタップ行為等を認識させることができなかった。ペン先が接触中に素手で金属部に触れると反応が見られることから、iPod等に採用されている静電容量式タッチパネルの特性が、試作装置の接触部の特性と不整合であることが原因と考えられるため、今後、ペン先の材料や形状について改善が必要であると考えている。

なお、本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成23年度福祉用具実用化開発助成金により実施したので、ここに感謝の意を表する。

文 献

- [1] 千原ら，“障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第1報)―頸髄損傷者用の新たな入力装置の試作と評価―”，岐阜県情報技術研究所研究報告第11号，pp.15-20, 2010.

歩行機能診断を目的とした安価な重心動揺分析システムの開発

大野 尚則 奥谷 知克* 藤井 優武**

Measurement of Motion Characteristics for the Diagnosis of the Elderly Walking Function

Naonori OHNO Tomokatsu OKUYA* Masatake FUJII**

あらまし 現在、歩行機能診断を実施する際、運動能力とバランス能力に関する検査が行われている。特にバランス能力の検査には高価な重心動揺計が用いられていることなどから、その診療報酬は高額となり、年金生活の高齢者にとっては大きな負担となっている。本研究では、介護施設や家庭で使える安価かつ簡便な装置を念頭に、歩行運動安定性やリハビリ効果を確認できるシステムの実現を目指す。そして高齢者の歩行機能診断を目的とした運動特徴量計測方法について提案する。また、評価実験の結果として、加齢や歩行障害の有無に起因する運動特徴量の差異を確認し本手法の有用性を示した。

キーワード 重心動揺, カオス時系列解析, 運動特徴量, 歩行機能診断, 生体ゆらぎ

1. はじめに

歩行機能診断を実施する際、運動能力とバランス能力を把握することが必要である。現在、6分間歩行検査や歩行計データを用いた運動能力の検査が行われ、また重心動揺計を用いてバランス能力の指標となる重心安定性の検査を行い、これらを総合して歩行機能やリハビリ効果を診断している。しかしながら、各々の検査項目に対して高価な医療機器とデータ分析作業が必要となるため、歩行機能診断を行う場合、結果的に診療報酬点数が高くなり、年金生活の高齢者にとっては経済的な負担となっている。

バランス能力を検査する方法として通常、重心動揺計が用いられる。この装置では受診者の直立不動時の重心の移動情報を基に面積・軌跡長検査やラバー負荷検査を行い、その結果を健常者の統計的データと比較して異常の有無を判断している。この方法では微小なバランスのぶれを抽出することが求められることから、使用される重心動揺計は高精度・高感度な荷重センサを具備し、床を伝搬するノイズ対策がなされているために高価な装置となっている。また、歩行時の運動能力を検査するための6分間歩行や、加速度センサ等を用いて歩行状況を自動的に計測する歩行計を使った検査については、単位時間あたりの歩行距離や時間を求め、健常者の統計データとの比較や、治療経過に対する相対的な数値比較により、

運動能力やリハビリ効果を判断している。しかしながら、検査環境や装置は必ずしも標準化されておらず、測定条件も異なることが多い。

バランス能力は自律神経の影響も大きい^[1]ため、測定値が体調や気分によって大きく影響されることから、臨床的に運動能力を判断するための定量的なデータとして用いることは難しい。

そのため筆者らは診断コスト（ハード製造コスト、データ分析コスト）の低減を目的とし、歩行機能を診断する新しい手法の確立と、介護施設や一般家庭において高齢者の利用を想定した安価で簡便な診断装置の開発を進めている。本稿では、歩行機能の診断を前提とした時系列カオス解析による足踏み運動時の運動特徴量計測手法について提案し、試作システムを用いた実験により抽出された運動特徴量の解析結果について報告する。

2. 生体ゆらぎによる計測手法

2. 1 生体ゆらぎ

生体ゆらぎとは、主に呼吸変動と動脈圧変動が自律神経を経由して、臓器や筋肉など生体内外を制御するための運動神経上に現れる一見不規則な波形変動である。脳波や心拍の信号を用いた生体ゆらぎの研究が盛んになされるようになり、臨床医学研究により生体ゆらぎの強弱変化や間隔変化の傾向が脳前頭葉の認知機能部の活性化度に比例することが公知となった^[2]。また生体ゆらぎを用いて脳活性度を評価することで、認知機能だけでなく長期的な加齢変化の定量化も可能となった^[3]。近年、これらの研究をベースにして生体ゆらぎと身体能力との関

* 株式会社デンソーアイティラボラトリ兼独立行政法人国立長寿医療研究センター

** 株式会社ブイ・アール・テクノセンター

連性に関する研究がなされるようになった。横山ら^[4]はフォースプレート等のデータを用いて歩行動作から生体ゆらぎ（歩調ゆらぎ）を観測し、タスク依存ではあるが身体能力の劣化との相関があることを示した。また、奥谷ら^[5]は高齢者ドライバのアクセルとブレーキの足踏み運動（ペダル操作量）から観測された生体ゆらぎは認知機能と高い相関関係にあることを示し、運転能力を定量的に判断するための有効な手段であることを示唆した。そこで本研究では、足踏み運動中に発生するタスク依存型の生体ゆらぎを計測するため、重心動揺計の重心移動情報を使って時系列カオス解析を行い、生体ゆらぎの影響による非線形性と決定論的性質を抽出し、これらを運動特徴量とする手法を提案する。

2. 3 時系列カオス解析による計測手法

足踏み動作時の足踏み位置やその荷重は、時間と共に複雑に変化する非線形の時系列データとして計測可能である。しかしながら、計測環境の影響によるノイズや被験者の年齢、体調など生体的な影響も加わることから、その複雑な挙動を詳細に解析することは容易でない。時系列カオス解析手法は、現実世界の複雑で不規則な時系列信号から、決定論的性質を単純な非線形信号モデルとして導き出す解析手法である^[6]。具体的には、非線形、非定常な波形信号から自己相関性（傾向）を持った力学運動の軌跡を可視化し、その傾向特性を定量化する手法である。この可視化をアトラクタ再構成という。今回の研究ではターケンスの埋め込み定理^[7]を使用し、ある一定の時間遅れ τ を用いて、時系列データを式(1)により空間ベクトル P としてアトラクタを再構成することとした（図1）。

$$P(t) = (x(t), x(t + \tau), x(t + 2\tau), \dots, x(t + (n-1)\tau))$$

n:埋込次元数 . . . (1)

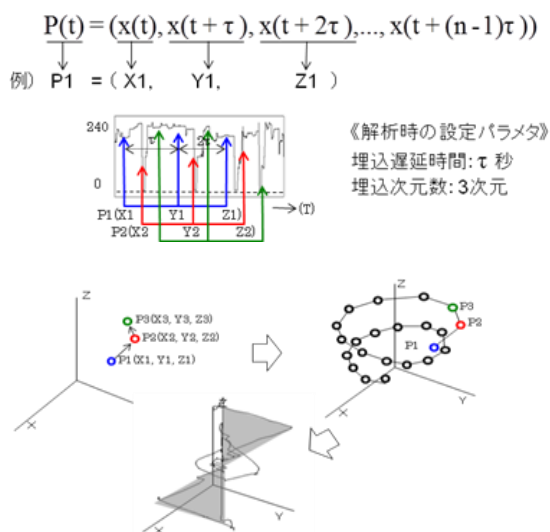


図1 ターケンスの定理によるアトラクタの再構成

また、この解析手法では力学系において接近した軌道が離れていく度合いを表す量としてリアプノフ指数が用いられる（図2）。本研究ではアトラクタとして表現された時系列データの傾向特性の軌道不安定性の度合いをリアプノフ指数で示すこととする。この計算にはリアルタイム性を考慮したSano-Sawada法^[8]を用い、超球サイズ、近傍点数、発展時間点数をパラメタとしてリアプノフ指数を調整する。本研究ではこの解析手法を使用して足踏み運動の運動特徴量を抽出することを試みる。

3. 足踏み運動による歩行運動特徴量の計測

足踏み運動から歩行機能に関する運動特徴量を定量的に計測する手法について具体的に述べる。

3. 1 時系列カオス解析による計測手法

本研究で用いる手法を図3に示す。これは時系列カオス解析によりアトラクタの再構成とリアプノフ指数の推定を行い、その結果を足踏み運動の運動特徴量とする方法である。その手順として、まず、重心動揺計から得られた足踏み時の重心動揺データから、床平面上の重心移動ベクトルを算出する。通常、重心動揺計とは、直立姿勢時の身体の重心位置を床平面の座標系のデータとして記録する装置であり、左右前後の4点に荷重センサを具備した構造となっている。今回、足踏み運動の運動データを収集するために一般的で安価なバランスWiiボード（任天堂社製、以下Wiiボード）を採用する。Wiiボードは一般的な重心動揺計と同じく、4点式の荷重センサを持つ。

次に、得られた重心移動ベクトルの重心動揺計の前後・左右2軸の成分の時系列データを使ってアトラクタの再構成を行う。ここでは良好なアトラクタを見つけだすため、ターケンスの埋め込み定理の埋込次元数と埋込遅延時間のパラメタを探索する。見つけだされたアトラクタは足踏み運動時の運動モーメントの傾向特性を視覚的に表現していることとなる。

その後、再構成されたアトラクタの重量の自己相関の不安定性の度合いを示すリアプノフ指数を推定し、この数値を、脳活性度を示す生体ゆらぎの定量的な指標として用いる。最後に足踏み運動における運動モーメントの安定性を定量的に確認するために、非定常な信号の解

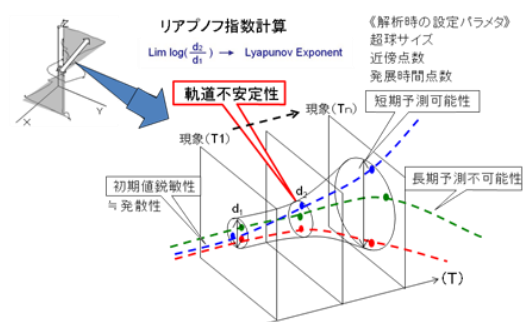


図2 リアプノフ指数の算出

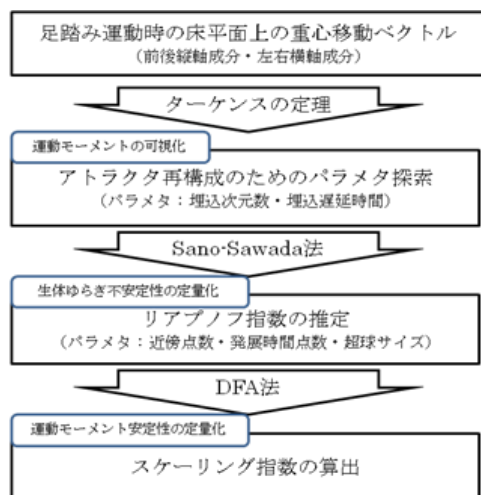


図3 手法の概要

析に対して有効であるスペクトル解析手法DFA (Detrended Fluctuation Analysis)^[9]を用いる。DFAで算出されるスケーリング指数は運動モーメントに起因する歩行の安定性を示す指標となることが報告^[10]されており、安定性が高いほど低い値となる。

3. 2 予備実験

一般的な重心動揺計と異なり、本実験で使用するWiiボードは民生用に開発されていることから、得られるデータには、計測時に接地面から伝搬する様々なノイズが含まれている。本手法は時系列データからアトラクタが再構成されることが前提となるため、予備実験として足踏み運動で得られたノイズが多く含まれる重心動揺データからのアトラクタ再構成の可否について調べた。

異なる床材（フローリングとPタイル）上にWiiボードを設置し30Hzのサンプリングレートで計測した足踏み動作の重心動揺データに対して、アトラクタ再構成のためのパラメタ（埋込次元数を4、埋込遅延時間を30(s)）とした結果、再構成されたアトラクタをある平面上に投影した写像が六角型となった。Pタイル上で取得された重心移動ベクトルの左右軸成分のパワースペクトルと再構成されたアトラクタを図4に示す。高い周波数帯に多くのノイズが含まれているが、六角形状のアトラクタを構成することができた。

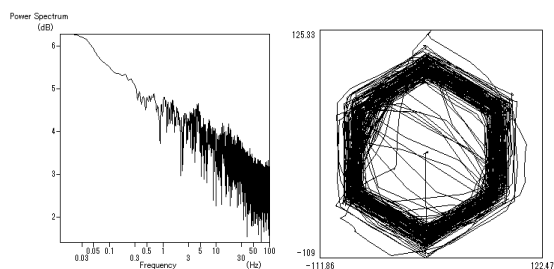


図4 データのパワースペクトルと再構成されたアトラクタ

4. 重心動揺分析システムの試作

4. 1 基本仕様

試作した重心動揺分析システムのハードウェア構成を図5に示す。重心動揺計として使用するWiiボードで計測された4つの荷重センサ値がBluetooth経由でプラグコンピュータに送られ、SDメモリに記録される。骨格動作取得用の3次元センサKinectは、当初、プラグコンピュータ内にインストールする予定であったが、Kinect用骨格動作取得用ドライバNITE（PrimeSense社）に関してプラグコンピュータのCPU（ARM系）に対応していないことが判明したため、試作したKinect関連のソフトウェアはLinuxノートパソコンにて動作させる。今後、NITEがARM系CPUに対応する計画であるという情報を得ていることから、対応後は予定通りプラグコンピュータで動作させる予定である。得られた重心動揺データと骨格動作データを記録時間情報を用いてAndroidタブレット上で同期表示させる。重心動揺データと身体姿勢を視覚的に提示することにより直感的な検査や診断が可能である。また、Androidタブレットに対応させ利便性も向上させている。

試作されたシステムから得られたデータを元に、足踏み運動解析システムでは、アトラクタの再構成を行い、歩行運動特徴量としてスケーリング係数とリアプノフ指数を算出する。

4. 2 ソフトウェア仕様

試作システムに関して開発を行ったソフトウェアモジュールを図5に示す。重心動揺データ取得・記録モジュールは、プラグコンピュータを起動するとデーモンプロセスとしてバックグラウンドで動作を開始し、WiiボードからのBluetoothのペアリング信号の受信待機状態となる。

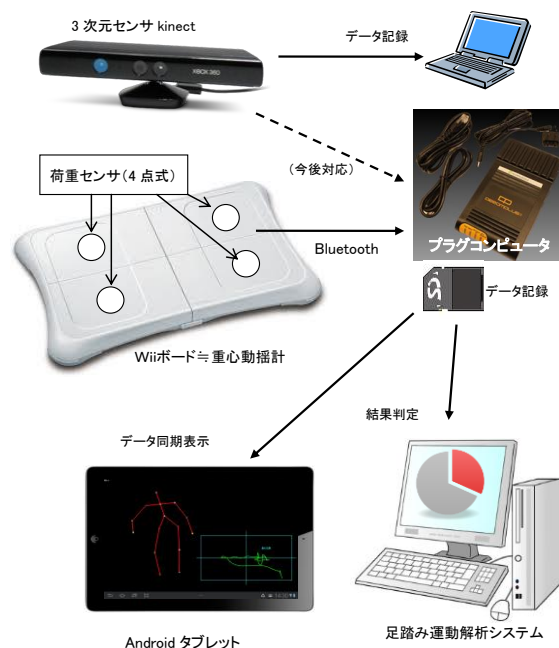


図5 ハードウェア構成

その状態で、Wiiボード裏面のSYNCボタンを押すことによりプラグコンピュータとのペアリングが完了し、1(s)間隔でWiiボードの青ランプが10回点滅し、記録準備完了となる。測定と記録は、Wiiボード上に2kg以上の荷重を検知した時点で開始され、1.5(s)以上荷重を検知しない場合には測定・記録停止となる。また、測定中はWiiボード全面のボタンランプが点滅する。取得されるデータは荷重センサ4点の値、重心座標、重心移動ベクトルであり、CSVファイル形式で記録される。

骨格動作データ取得・記録モジュールについても、デモンプロセスとしてLinuxノートPCを起動させるとバックグラウンドで動作を開始する。骨格動作を取得するためには、キャリブレーションが必要であり、その手順として、1)kinectから全身が映るように立ち、被験者が検出されると短いピープ音が出力される。2)指定するキャリブレーションポーズを行い、キャリブレーションが完了すると長いピープ音2回出力され、3)骨格情報の取得が開始されると長いピープ音を出し記録が開始される。記録を停止する場合は指定する停止ポーズをするか、またはkinectの視野角からはずれれば記録が停止され、長いピープ音2回を出力する。取得されるデータは関節等16点の3次元座標値がCSVファイル形式で記録される。データ同期表示モジュールは、CSV形式で保存された重心動揺データと骨格動作データを読み込み、双方で記録された日付情報を元にグラフィックス表示を行う(図6)。

5. 評価実験

試作した重心動揺分析システムで得られたデータから、再構成されたアトラクタを運動モーメントの安定性、またリアプノフ指数を生体ゆらぎの不安定性(脳活性度)

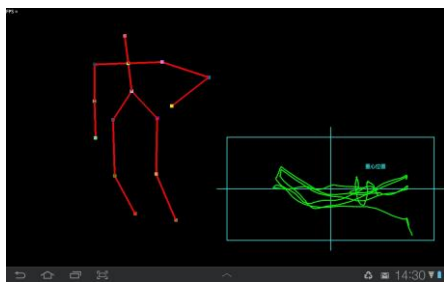


図6 データの同期表示(左:骨格動作, 右:重心)

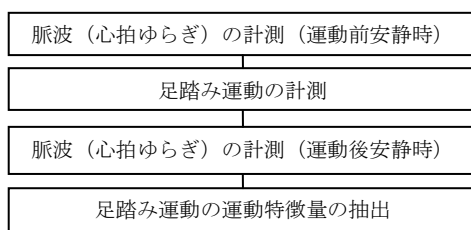


図7 実験の手順

として、足踏み運動の運動特徴量を抽出する実験を行い、年齢との相関を観察し提案手法の有効性を確かめた。

5. 1 実験条件

実験手順を図7に示す。まず足踏み運動前の安静時の心拍ゆらぎを計測する。指尖脈波測定解析装置BACS(CCI社製)を使用し、指尖センサを用いて脈波を椅子に座った状態で3分間計測する(図8)。この手順により実験時の被験者の体調等の生理的な状態を把握する。次に試作された重心動揺分析システムを用いてWiiボード上で3分間の足踏み運動を行い(図8)、足踏み姿勢時の被験者の左右方向をX軸、前後方向をY軸とした重心位置データをSDメモリ上に記録する。実験終了後の安静時の心拍ゆらぎも座位姿勢で3分間計測する。東京、福岡、岐阜在住の30~70代の被験者27名に対して木質フローリング又はカーペット上にWiiボードを設置し実験を行った。

5. 2 運動特徴量解析1と結果

得られた重心移動ベクトルのX軸成分とY軸成分それぞれに対し、予備実験で得られたパラメタ(埋込次元数4, 埋込遅延時間30(s))を用いてアトラクタの再構成を行った。X軸成分についてはアトラクタ形状が再構成できた。その代表的な形状を図9に示す。図9右下に示すアトラクタは脳梗塞半身不随者のものであり、他者の形状とは著しく歪んでいた。その他のアトラクタは歪みながらも六角形状に近いアトラクタ形状となり傾向特性が抽出できた。しかしながら、超球サイズ0.10, 近傍点数20, 発展時間点数30として推定されたリアプノフ指数の値を算出した結果からはリアプノフ指数と年齢との相関はなく、加齢とともに発散する傾向がみられたことから、このアトラクタ形状は生体ゆらぎの脳活性傾向を示すものではないと考えられる。



図8 脈波の計測と足踏み運動の測定

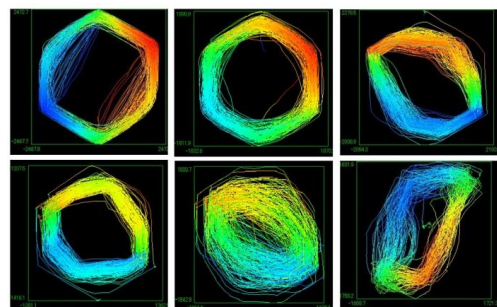


図9 アトラクタ形状(埋込遅延時間30(s))

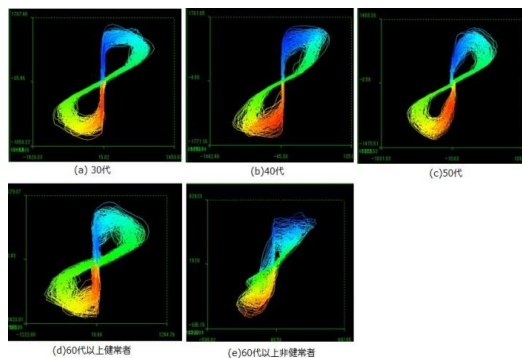


図10 年代別アトラクタ形状(遅延時間8(s))

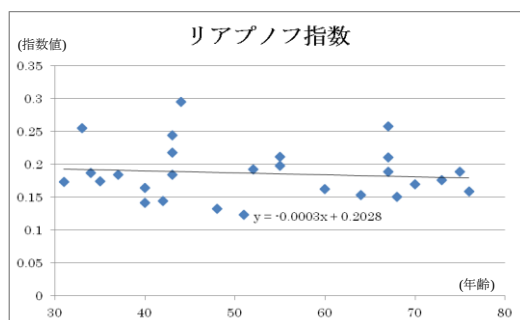


図11 年齢とリアプノフ指数(X軸成分)の相関

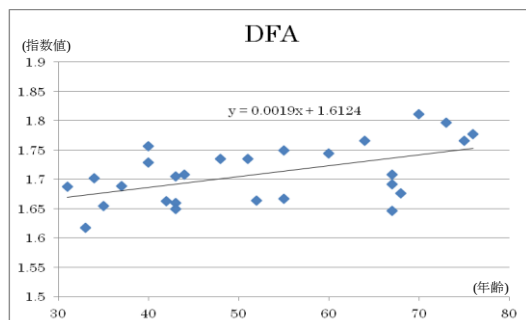


図12 年齢とスケーリング指数(X軸成分)の相関

5. 3 運動特徴量解析2と結果

前項の結果を踏まえ、運動特徴量として有効なアトラクタを再構成するため、別のパラメタを探索した。その結果、埋込次元数4、埋込遅延時間8(s)の時に重心移動ベクトルのX軸成分についてはすべての被験者のデータから一様に蝶型のアトラクタが確認された。図10は年代毎の代表的なアトラクタ形状である。加齢とともに歪みやぶれが大きくなっている傾向が確認できた。歩行障害を持つ高齢者の足踏み運動から抽出されたアトラクタ(図10(e))は著しい歪みが観察できた。

次にX軸成分の再構成されたアトラクタからリアプノフ指数(超球サイズ:0.08, 近傍点数:20, 発展時間点数:30)を推定し、年齢との相関をグラフ化した結果を図11に示す。強い相関は見られなかったが、加齢するにつれてリアプノフ指数が小さくなる傾向が確認できた。

また再構成されたアトラクタの安定性の指標として

DFAによりスケーリング指数を算出した。その結果を図12に示す。今回の結果では加齢に伴いスケーリング指標が高くなる傾向が確認できた。

6. 考察と今後の課題

6. 1 解析結果について

運動特徴量解析1では、ターケンスの埋め込み定理の埋込遅延時間を30(s)とした場合、重心移動ベクトルのX軸成分のアトラクタの写像が六角形状となることを確認した。また、ここで得られた脳梗塞半身不随者のアトラクタは著しくひずんでいることから、形状が運動モーメントの安定傾向を示すものであると考えられる。よって、運動特徴量解析1で使用したパラメタを用いて解析を行うことにより足踏み運動に関わる整形外科的な異常を視覚的に容易に把握できると考えられる。またこの解析から推定されたリアプノフ指数は加齢との相関がみられなかったため、再構成されたアトラクタ形状は生体ゆらぎの脳活性傾向を示すものではないと判断できる。

次に運動量解析2で使用したパラメタ(埋込遅延時間8(s))を用いて再構成されたアトラクタ(X軸成分)はすべての被験者について一様な蝶型となったことから、足踏み運動に関する有用な傾向特性を抽出することができたと考えられる。再構築されたアトラクタから推定されたリアプノフ指数と加齢に関して高い相関は観察できなかったが、加齢に伴い低下傾向にあることは確認できた。既に公知となっている加齢と生体ゆらぎの相関と同様な傾向となっており本手法の有効性が確認できたと考える。また、被験者の母数を増やしアトラクタ形状が近い母集団に対して解析を行うことにより、年齢とリアプノフ指数の高い相関を示すことができると考える。更に、脳活性度と認知能力は相関があることから、提案手法で求められたリアプノフ指数は、認知症を診断するための定量的な指標となり得ると思われる。

更にDFAにより算出されたスケーリング指数については加齢に伴い増加する傾向がみられ年齢が高いほど整形外科的な運動モーメントのぶれが大きいことがわかった。また、歩行障害を持つ被験者のアトラクタはその写像が他の被験者と比較して視覚的に著しい歪みがあることも確認できたことから、本手法は整形外科的な検査の定量的な指標としても用いることができると考えられる。

6. 2 今後の課題

足踏み運動時の生体ゆらぎと加齢の関係性については、今後、更に被験者の母数を増やし相関があることを明らかにする。またアトラクタ形状から足踏み運動時の運動モーメントに起因していると考えられる差異が見られたが、現状、その発生要因を分析するまでには至っていない。今後、kinectで得られた足踏み運動時の骨格動作の解析を行い、今回の結果と比較検証を行う予定である。

7. まとめ

民生用ハードウェアを流用した安価な重心動揺分析システムを試作し、その有用性を示すため評価実験を行った。また、得られた時系列の重心動揺データ等を用いて時系列カオス解析手法によりアトラクタを再構成し、この形状からリアプノフ指数とスケーリング指数の推定を行い、生体ゆらぎの不安定性と運動モーメントの安定性を運動特徴量として定量的に抽出する手法を提案した。ターケンスの埋め込み定理の埋込次元数4, 埋込遅延時間8(s), リアプノフ指数推定時の超球サイズ0.08, 近傍点数20, 発展時間点数30として重心移動ベクトルのX軸成分を解析した結果、運動特徴量の抽出に有効なアトラクタが再構成された。また、このアトラクタから推定されたリアプノフ指数とスケーリング指数が加齢に伴い変化する傾向を確認し、試作したシステムならびに提案手法の有効性を示した。将来的に本手法に基づき認知症などを判定する“生体ゆらぎ解析器”へと展開させるため、更なる研究を進める。

謝辞 本研究は文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム（都市エリア型）岐阜県南部エリア「モノづくり技術とITを活用した高度医療機器の開発」の可能性試験事業として、財団法人岐阜県研究開発財団から支援を受けたものである。ここに感謝の意を表する。また、今回実験に協力いただいた被験者の皆様や株式会社CCIの皆様に深謝する。

文 献

- [1] 木村哲也, “立位バランス制御機構に対する自律神経系の関与—加齢に伴う自律神経活動低下の影響—”, 第26回健康医科学研究助成論文集, pp.41-48, 2011.
- [2] 鈴木良次ほか, “生体信号—計測と解析の実際”, コロナ社, 1989.
- [3] 劉僖根, 鈴木秀明, “カオス性からみた心拍変動の加齢変化”, 豊橋創造大学紀要, pp. 161-170, 1997.
- [4] 横山慶一ほか, “331. 高齢者の歩調ゆらぎと筋力・バランス能力・柔軟性の連関, 加齢・性差”, 第61回日本体力医学会大会, 2006
- [5] 奥谷知克, 岩崎弘利, 伊藤安海, 久保田怜, “ペダル操作による高齢者ドライバの運転特徴量の計測”, 自動車技術会2011秋季大会, 2011.
- [6] 池口徹, 山田泰司, 小室元政, “カオス時系列解析の基礎と応用”, 産業図書, 2000.
- [7] FLORIS TAKENS, “DETECTING STRANGE ATTRACTOR IN TURBULENCE”, IN D.A.RAND AND B.S YOUNG, EDITORS, DYNAMICAL SYSTEMS OF TURBULENCE, VOL.898 OF LECTURE NOTES IN MATHEMATICS, SPRINGER-YERLAG, pp.366-381(1981).
- [8] M.SANO, Y.SAWADA, “MEASUREMENT OF THE LYAPUNOV SPECTRUM FROM A CHAOTIC TIME SERIES”, THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY. PHYSICAL REVIEW LETTERS 2 SEPTEMBER 1985, VOL.55, NO.10, pp.1082-1085, 1985.
- [9] PENG C-K, HAVLIN S, STANLEY HE, GOLDBERGER AL. QUANTIFICATION OF SCALING EXPONENTS AND CROSSOVER PHENOMENA IN NONSTATIONARY HEARTBEAT TIME SERIES. CHAOS 1995-5, pp. 82-87, 1995.
- [10] 横山慶一, 木村みさか, 小田伸午, “歩行安定性指標としての歩調ゆらぎの有効性”, 加齢・性差一般口演, 第63回日本体力医学会大会, pp. 808, 2008.

ジグ設計評価の構造解析に関する研究(第2報)

横山 哲也

Research on Evaluation of Jig Design using FEM (2nd Report)

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 切削加工においてジグ設計が適切でないと、切削中に材料がずれ動くことがあり加工精度が低下する。ジグ設計が不適切となる理由の1つに、設計指標がなく熟練者の経験に依存していることが挙げられる。本研究では作業者の経験に依存しない、ジグ設計評価手法を構築することを目的に、NCデータに基づく切削シミュレーションを構築した。シミュレーションではクランプと被削材間に働く力が算出できることから、過大な切削力による材料のずれ動く可能性を数値化することができる。

キーワード ジグ設計、有限要素法、切削抵抗

1. はじめに

切削加工において、図1に示す被削材の動きを固定するジグは加工精度に大きな影響を与える。配置位置、配置個数および締付け力を決めるジグ設計が適切でないと、被削材のずれ動きが発生し加工精度を低下させる原因になる。

被削材のずれ動きを抑えるためには、切削中に発生する切削抵抗を考慮した力でジグを締付ければよい。しかし、切削中は被削材上を切削工具が移動するため、ジグが受ける切削抵抗の分力は変化する。またジグの締め付け力が過大な場合は、被削材に塑性変形を与えることになる。それらを考慮して締め付け力を決定する必要がある。ジグ設計が不適切となる理由の1つには、ジグ設計に明確な指標がなく、作業者の経験に依存していることが挙げられる。そのため、ジグ設計評価手法の構築は、支援ツールとして非熟練者のジグ設計を可能とし、加工品質の向上を図ることができる。

我々は上記課題の解決策として、有限要素法を用いた構造解析を行い、フライス加工を用いた切削加工において、ジグに作用する切削抵抗の分力を算出した^[1]。本年度は被削材の動きを固定するクランプジグの変形も考慮し、NC加工プログラムに基づいたシミュレーションを構築する。これにより、クランプと被削材との合わせ面に働く力を算出することで、合わせ面で滑りが生じる可能性が分かり、ひいては被削材のずれ動く可能性を数値化することができる。また、構造解析に係る計算時間の短縮を図るため、GPUを用いた有限要素法の解法を行う。

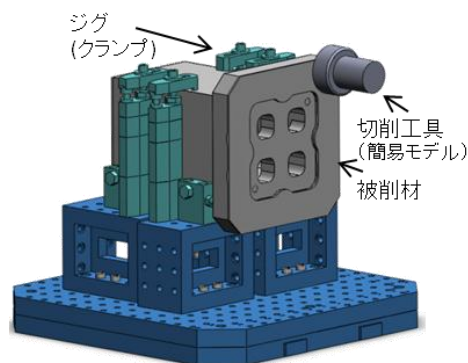


図1 ジグで固定された被削材のフライス加工

2. 切削シミュレーションの構成

2. 1 概要

図2に切削シミュレーションの概要図を示す。CAMソフトで計算した工具のツールパスをNCデータで出力し、切削シミュレーションに与える。シミュレーション内部でNCデータを解析し一連のツールパスをつくる。そのツールパス上を工具が一定距離の刻み幅で進むものとして、被削材と工具の衝突判定を行い、その結果を受けて切削抵抗を計算する。切削抵抗を外力として、有限要素法を用いた構造解析を行い、被削材とクランプの変形を計算とする。併せて、被削材とクランプの接触面間に作用するクランプ力を計算し、合わせ面で被削材が滑る可能性を数値化する。作業者はその値をもとに、被削材とクランプ間の接触状態を選択するか、切削条件またはジグ設計を見直しCAMソフトでツールパスを再計算させる。

切削シミュレーションの変形・応力計算は、有限要素法に基づく構造解析を行っている。本シミュレーションでは工具の動きに応じて境界条件を逐次変更し、切削量

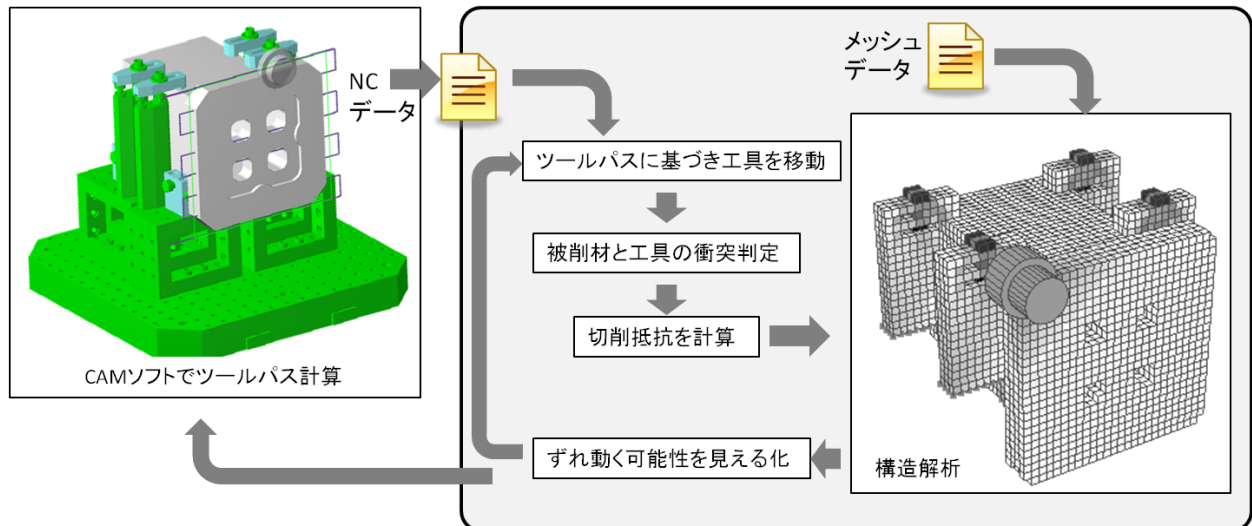


図2 切削シミュレーション概要図

に応じて被削材の剛性変更する必要があるため、専用のソルバーを開発した。ソルバーに与えるメッシュデータは、汎用性のあるNastran Bulk Data形式で記述してある。

2. 2 有限要素法を用いた変形算出

有限要素法は対象物体を有限要素で構成し、物体の特性値を組み込むことで、物体が外力を受けた際の変形と反力を正確に計算できる。本研究では有限要素法を用いて被削材に切削抵抗が働いた際の、ジグに作用する切削抵抗の分力を算出する。なお、変形は微小であることから、線形有限要素法を適用する。

我々は先の研究^[1]で有限要素を1次四面体としていたが、本年度はより精度を高めるため、図2に示す六面体のボクセルメッシュに変更とした。また、曲げによるロッキングにも対応できるように非適合要素とした。

有限要素法による剛性方程式は、外力 F 、変位 u 、剛性行列 K と物体力(重力) Mg を用いて式(1)で与えられる。

$$F = Ku + Mg \quad (1)$$

式(1)をベクトル、行列の要素を用いて書き直す。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_{cu} \\ F_{cl} \\ * \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_f \\ u_{cu} \\ u_{cl} \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (2)$$

添字の f, cu, cl は非拘束(free)ノード、切削抵抗(cutting force)が働くノード、締付け力が働くクランプジグ(clamp jig)のノードを指す。なお、式(2)の左辺第1行は外から荷重を受けないため0である。第4行はクランプを固定しているノードに関する式であり、ノードが固定されていることから変位は0とした。また、その固定ノードに働く力は、シミュレーションでは求めないため、*で置き換えた。

式(2)の剛性方程式は剛性行列 K が逆行列をもたないた

めに、解くことができない。そこで、式(3)のように剛性行列の一部対角要素に単位行列 I を設けるよう変形することで解を求める。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_{cu} \\ F_{cl} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K' & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_f \\ u_{cu} \\ u_{cl} \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (3)$$

式(3)のクランプ締付け力 F_{cl} は既知であるから、切削抵抗 F_{cu} が作用した際、共役勾配法^[2]を用いて右辺の変位 u_f, u_{cu}, u_{cl} を算出する。

2. 3 クランプと被削材間に働くクランプ力の算出

前節の変位計算結果を用いて、クランプと被削材間に働くクランプ力 f_{cl} を求める。 f_{cl} はクランプと被削材間の共有ノードに働く力であり、式(2)の第1行に示すように内力であるため値はゼロである。そこで、図3に示すようにクランプに属する有限要素と、被削材に属する要素を仮想的に分離する。分離した状態で共有ノードにかかる内力を計算することで、非ゼロの f_{cl} が計算できる。

$$f_{cl} = \sum_i K_e u \quad (4)$$

ここで K_e は有限要素の剛性行列である。添え字の i は、共有ノードが属する有限要素の識別子である。

被削材とクランプとの合わせ面で生じる滑りの有無は、

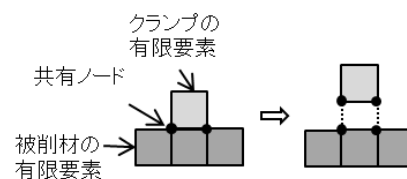


図3 有限要素の分離

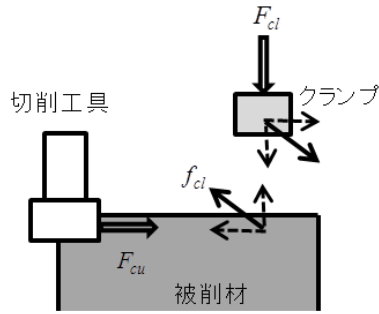


図4 クランプと被削材間に働く作用力 f_{cl}

クランプ f_{cl} を用いて以下の式で判断できる。

$$|f_{cl_t}| \leq \mu |f_{cl_n}| \quad (5)$$

ここで μ は摩擦係数、 f_{cl_t} 、 f_{cl_n} は f_{cl} の接線成分力と、法線成分力である。式(5)の関係が満たされない f_{cl} が作用する場合、クランプと被削材間で滑りが発生し、材料がずれ動く。

本研究で扱う切削シミュレーションは、被削材とクランプの接触状態を固着とするため、摩擦係数を使用せず、接線力と法線力の比 $|f_{cl_t}| / |f_{cl_n}|$ を滑り可能性の指標とする。摩擦係数を使用しない理由は、被削材とクランプの間の接触状態に応じて摩擦係数が変化するため、作業員が接線力と法線力の比を上回る摩擦係数の接触状態を選択すればよいと考えるからである。また、接線力と法線力の比を上回る摩擦係数の接触状態がない場合は、切削条件やジグ設計の見直しを図り、接線力と法線力の比を下げることになる。

2. 4 切削抵抗の算出

本手法はNCデータに基づき工具位置を併進させるシミュレーションであり、工具刃先の回転まで考慮していない。そのため、切りくず厚みに比例した切削抵抗を計算することができない。そこで工具の1刃当りの送り量を切りくず厚みとして計算した切削抵抗を、工具がシミュレーション1周期で削り落とす領域全体に作用させて計算した^[1]。この手法は、刃先と材料の接触部の応力状態を正確に表現できないが、本研究が目的としているクランプ近辺の応力を求めるには、その影響は低く抑えることができる。

本研究ではフライス加工の切削を対象とし、使用する工具は底がフラットな形状とし、工具の側刃で切削を行う。切削抵抗を算出するにあたり、被削材内に均等に質点を配置し、切削工具の動きに応じて質点と工具の干渉を判定する。ここでの干渉は幾何学的な干渉であり、切削工具の領域内で質点の内外判定を行う。

工具と干渉する質点に働く切削抵抗 F_{cu} を以下のとおり算出する。

$$F_{cu} = NKsA \cos \theta = NKs l F_z \cos \theta \quad (6)$$

ここで N は同時切れ刃数の最大値、 Ks [N/mm²] は比切削抵抗、 A [mm²] は切削面積とし、 l [mm] は切削工具軸方向の切り込み量である。 $\cos \theta$ は工具進行方向に対して工具と干渉した質点の配置角度である。 F_z [mm/tooth] は切削工具1刃当りの送り量で、以下の計算式で算出する。

$$F_z = \frac{F}{ZS} \quad (7)$$

ここで S [rpm] は切削工具の回転数、 F [mm/min] は送り速度、 Z は切削工具の刃数である。シミュレーション1周期における干渉質点に働く切削抵抗は、式(6)で求めた F_{cu} を工具軸に垂直な平面内に存在する干渉質点個数で割った値とした。

3. GPUを用いた計算時間の短縮

本研究で扱う切削シミュレーションでは有限要素法を用いることから、被削材料の有限要素を細かくするほど、計算結果の精度は向上する。ただし、式(3)の連立方程式を解くにあたり、有限要素を構成するノード数の2乗に比例した計算時間が費やされるため、有限要素を細かくするほど効率が悪くなる。そこで本章では、グラフィックボードのGPU(Graphic Processing Unit)を用いて計算時間の短縮を図る。GPUはSIMD(Single Instruction Multiple Data)等を用いることで並列計算を可能とし、大規模行列計算における有益なツールである。

式(3)の連立方程式を解くにあたり、剛性行列 K' の記憶方法を変更する。 K' は疎行列であるから、このままの形で行列・ベクトル演算を行うと無駄な乗算が発生する。本研究では行方向を圧縮したCRS(Compressed Row Storage)形式で K' の要素を記憶することで、疎行列計算に対応する。

式(3)の解を共役勾配法^[2]を用いて反復計算で求める。共役勾配法は、解ベクトルの次元数以下の回数で反復計算解が収束する。さらに、剛性行列の条件数を小さくする前処理を施すことで、収束が速くなる。そこで本研究では、前処理として対角スケールリングを使用した。NVIDIA社のグラフィックボードGeForce GTX480のGPUを用いて、共役勾配法と対角スケールリングを実装した。実装に当たっては、NVIDIA社CUDAライブラリのCUSPARSEライブラリを使用することで、CRS形式の行列・ベクトル演算に対応した。剛性行列要素はシミュレーション起動時にパソコンからGPUへ一括して送信している。計算が終了したときは、計算結果のみGPUからパソコンへ送信する。材料が削られ剛性要素が変化したときは、要素の変更箇所だけデータ転送する。

表1 計算時間の比較

	共役勾配法 +前処理[秒]	共役勾配法 [秒]
パソコン(OpenMP)	6.4	11.1
GPU	1.26	2.12

図2で示す有限要素モデルを用いて、パソコンとGPUでの計算時間の比較を行った。このモデルにおける有限要素のノード数は13,890、解ベクトルの次数は41,670である。計算に用いたパソコンはDELL社のXPS-720で、CPUはInter Core2 Extream(3.0GHz)、並列演算ライブラリOpenMPを用いて並列演算している。

表1に計算時間を示す。GPUを用いることで計算時間が短縮できたことがわかる。参考までに、共役勾配法みの計算時間も記載する。材料のサイズが大きくなると、有限要素の数が増加するため、GPUを用いても計算時間の増加は免れない。今回利用したCRS形式のGPU計算は、GPU内でのデータ転送のレイテンシが大きいことから、レイテンシを小さくする対応が必要である。

4. 切削加工のシミュレーション

本章では、NCデータに基づいて切削加工のシミュレーションを行い、被削材のずれ動きについて検討を行う。シミュレーションする加工は、正面フライスをを用いた面出しで、使用したフライスの軸方向のすくい角度は 0° とした。また、材料の物性値を表2に示す。

図5に、10,000[N]でクランプを締付けた際のクランプと被削材間に発生するクランプ力 f_{cl} を示す。図中のクランプの上にある数字がクランプのIDを示し、そのクランプにかかる f_{cl} の成分(単位は[N])を図右上に示す。図中の $|f_{cl_t}|/|f_{cl_n}|$ が、クランプと被削材の合わせ面に働くクランプ力の接線力と法線力の比である。この値が大きくなるほど、合わせ面で被削材が滑る可能性が高く、ひいてはずれ動く可能性が高くなる。

シミュレーションで求めた面出し加工時のクランプ力 f_{cl} を図6(a)(b)に示す。切削工具の進行方向および工具の回転方向を図中の矢印で示す。また、白抜き矢印で、計算で求めた切削抵抗の向きを示す。図6(a)のダウンカットにおいて、工具に近いクランプ#2と#4で切削前(図5)に比べて f_{cl} のx成分が負に変化、#4ではy成分が負に

表2 材料物性値

材料名	物性値	
被削材 (ねずみ鋳鉄)	ヤング率	200[GPa]
	ポアソン比	0.27
	密度	7.2[g/cm ³]
クランプ (S45C)	ヤング率	205[GPa]
	ポアソン比	0.3
	密度	7.8[g/cm ³]

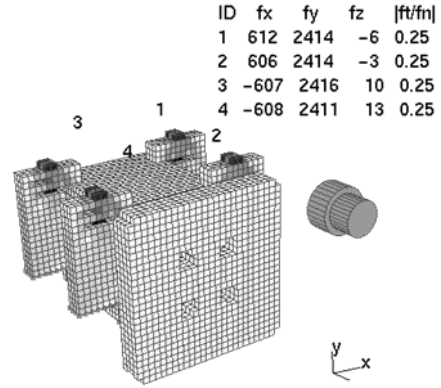


図5 クランプ締付け（切削前）

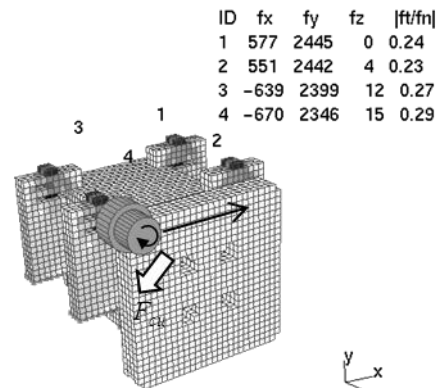


図6(a) 面出し加工（工具位置は左上）

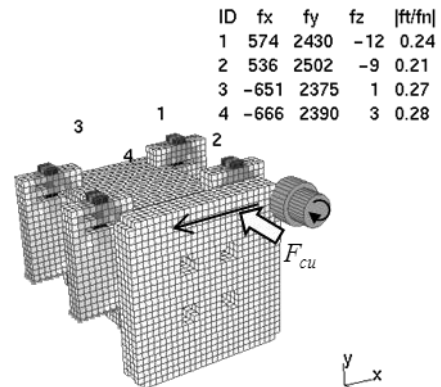


図6(b) 面出し加工（工具位置は右上）

変化している。図6(b)のアップカットにおいては、#2と#4ではx成分が負に変化、y成分が正に変化している。図中の比より、この面出し加工において、被削材とクランプ面の合わせ面が滑る可能性が一番高いのは、加工開始時（アップカット）のクランプ#4である。

今回のシミュレーションケースでは、クランプの締付けで接線力と法線力の比が0.25であるため、材料の加工面が支持片に接するクランプ（摩擦係数が0.1~0.15^[3]）は滑りを生じる可能性が高く、使用を避けるという結果が得られる。

5. まとめ

フライス加工を用いた切削加工のジグ設計評価手法を構築するため、有限要素法を用いた切削シミュレーションを構築した。本年度は被削材の動きを固定するクランプジグの変形も考慮し、NC加工プログラムに基づいたシミュレーションを構築した。その結果、被削材とクランプジグとの合わせ面に働くクランプ力を算出することができ、その接線力と法線力の比から、合わせ面での滑りが発生する可能性を数値化した。

接線力と法線力の比の値が小さい場合、被削材とクランプの合わせ面の接触状態（面接触、点接触）、接触面の面出し有無等で摩擦係数を選択すること、材料のずれ動きは未然に防げると考える。値が大きい場合は、値そのものを小さくするよう、切削条件の見直しまたはジグ設計の見直しを図る必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、CADデータの提供およびジグ設計の指導頂きました株式会社イマオコーポレーションに感謝致します。

文 献

- [1] 横山哲也, “ジグ設計評価の構造解析に関する研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第12号, pp.15-16, 2011
- [2] 戸川隼人, “共役勾配法”, 教育出版, 1990.
- [3] 酒庭秀康, “現場で役立つモノづくりのための治具設計”, 日刊工業新聞, 2006.

製造情報の可視化支援ソフトウェア部品の開発

大野 尚則

柳沼 吉伸*

中村 隆雄**

Development of Software Components for Visualizing Product Information

Naonori OHNO

Yoshinobu YAGINUMA*

Takao NAKAMURA**

あらまし 生産活動の高度化や技術的課題の解決のために現場で蓄積されている製造情報を利用者のニーズに応じて視覚的に表示することは非常に重要である。本研究では製造情報の可視化を支援するソフトウェアツールについて検討を行った。本年度は一般的に使用されている表計算やデータベースソフトウェア上に蓄積された既存のデータを操作するソフトウェア部品の開発を行った。また、応用事例として製造関連の県内企業共同で現場のニーズに即した有用なシステムを試作した。

キーワード 製造情報, 可視化, コンポーネント, MZプラットフォーム

1. はじめに

製造業において、現場で生成されるすべての情報は企業にとって貴重な財産である。生産効率や製品品質の向上や直面する様々な課題の解決など、生産活動の高度化だけでなく経営者の正しい意志決定を行うためにも必要不可欠な情報である。

コンピュータ技術とネットワーク技術の普及により様々な情報がデジタル化され、社内ネットワークを介して情報の共有化がなされるようになった。しかしながら業務内容の違いから部署単位での情報共有に留まり他部署は別システムや様式で管理されている場合がある。また全社的な情報共有は紙媒体で行う例も多い。

本研究では、蓄積されたデジタルデータや技術情報を有効活用することを目的として、製造情報の可視化支援ツールの開発を行っている。本年度は一般的に利用されている表計算とデータベースソフトウェアのデータファイル内のテキストや数値データを、容易に入出力するためのデータアクセスツールを開発し、県内企業と共同でこのツールを組み込んだ応用システムを試作した。

ぐことで、設計・製造業務を支援するシステムを手軽に短期間で開発することができるツールである。複雑なシステムでなければプログラムレスで情報システムが構築できることから、現在、全国500以上の企業等で活用されている。また岐阜県では平成22年度に「MZプラットフォーム活用研究会」を立ち上げ、県内企業と共にMZPTの技術習得や各社のニーズに応じた情報システムの共同開発に取り組んでいる。しかしながらMZPTはコンポーネントと呼ばれる汎用性に優れた非常に小さい単位のソフトウェア部品（以下、コンポーネント）で構成されているため各々の部品の習得に時間がかかることや、現場の技術者が本業の傍らで自らシステム開発を行うにはデータベース等の既存システムの周辺情報などの技術的な基礎知識が必須となるため、目的とするシステムの開発期間が長期化するといった課題がある。

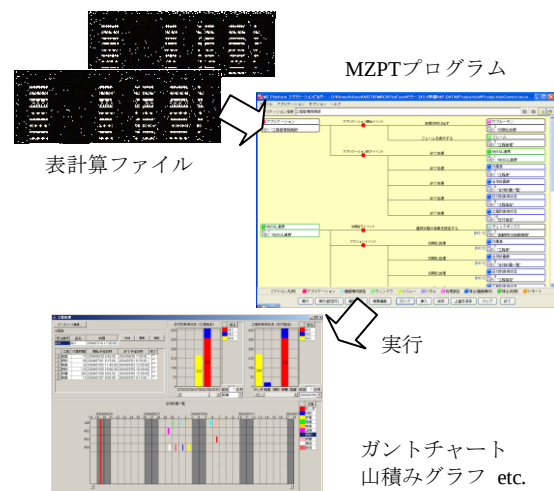


図1 MZPTによる表データの可視化

2. 可視化支援ソフトウェア部品

2.1 MZプラットフォーム

本研究では平成15年から産業技術総合研究所が無償公開している「MZプラットフォーム」^[1]（以下、MZPT）を活用している。MZPTは中小企業のものづくり支援を目的に開発されたソフトウェア開発・実行環境であり、コンポーネントと呼ぶソフトウェア部品を視覚的につな

* 岐阜プラスチック工業株式会社

** 福田刃物工業株式会社

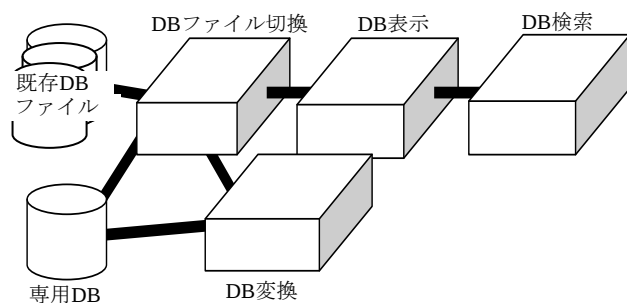


図2 開発した複合コンポーネントの構成

2. 2 既存データの活用

中小企業において製造情報の記録・蓄積用にMS Excelに代表される表計算やデータベースソフトウェアが一般的に使用されている。多くは部署内のLANを介してデータファイルをネットワーク共有している。本研究ではこれらのデータファイルを簡単に操作し処理できるコンポーネントについて検討を行った。一般的に使用されている表計算を含むデータベースソフトウェアはODBC(Open Database Connectivity)という内部データを処理するための共通インタフェースを持っており、業界の標準規格となっているデータベース言語SQL(Structured Query Language)により内部データを操作できる。MZPTにはSQLコマンドを送信する標準コンポーネント「データベースアクセス」が存在するが、SQLコマンドの生成などの処理は利用者が独自で構築する必要がある。特にSQLコマンドの生成のシステム化は、ものづくりに携わる技術者にとっては煩雑で難解な課題である。

そのため、本研究ではデータファイルを取り扱うにあたって必要となるSQLコマンドを機能毎に集めた複合コンポーネントとして構築した(図2)。図中の直方体は関連するSQLコマンドの生成と関連処理の機能の集合体となっている。「DBファイル切替」は既存データベース(以下、DB)ファイルへの接続パラメータを保持し、容易に使用するファイルを切り換える機能を有する。最も活用されていると考えられるMS ExcelとMS Accessのファイルのデータ操作に対して動作を確認した。「DB表示」はDB内に含まれるテーブル情報をツリー形式で表示する。

「DB変換」は複数の既存DBファイルを専用DBで一元化するためのデータ変換用の複合コンポーネントである。専用DBとして無償で利用可能なデータベースサーバMySQLでの動作を確認している。膨大なDBデータを操作し効率よく希望のデータを抽出するため、検索機能は非常に重要である。そのためのSQLコマンド文の作成は最も技術を要する部分であるが、開発した「DB検索」複合コンポーネントは検索対象や条件を画面で確認しながらマウス操作とテンキーで絞り込むことができる。

3. 応用例とまとめ

試作した複合コンポーネントの応用例について紹介す

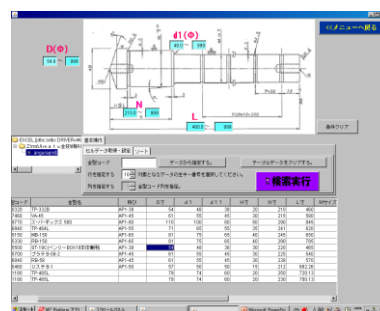


図3 類似部品検索ツール

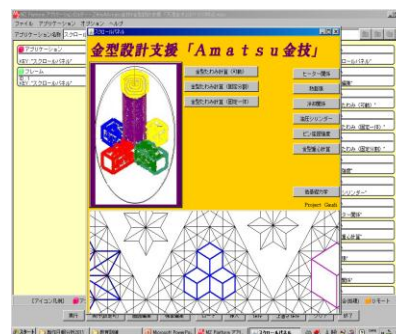


図4 設計支援ツール

る。これらは「MZプラットフォーム利活用研究会」にて、プログラム経験の無い製造業の技術者が開発した業務用システムであり、現在、実運用されている。

3. 1 データ検索ツール

製造現場において、過去に設計・製造した製品の構成部品の技術情報が記録されたMS Excelファイルのデータを読み込み、類似する形状や性能の部品を検索するツールである。MZPTにより現場のニーズに応じたシステムのカスタマイズが可能であるため、通常のDBソフトウェアでは構築困難な機能を実現することができる。例えば、検索により抽出された部品情報の中から特定の部品を指定して、再度、その部品に類似する別の部品を抽出する機能は非常に強力な機能であるが、通常の市販ソフトウェアのマクロ等では実現が難しい機能である。

3. 2 技術支援ツール

現場で蓄積された技術情報以外に、業界内で確立されている設計手法やメーカから提供されるカタログなど、実際の設計業務に活用できる情報が数多く存在する。これらを表計算ソフトで整理し、現場のノウハウを含めて関連情報を一元的にDB化することにより、技能伝承にも有用な技術支援ツールを実現することができる。図4は構築した金型設計に関する支援ツールである。図表を活用した視覚的にわかりやすいシステムとなっている。

文 献

- [1] 独立行政法人産業技術総合研究所 MZプラットフォーム研究会, http://www.monozukuri.org/mzpf/mz_top.html, 2012.

人の動線推定に関する研究開発

— 移動量測定技術の基礎検討 —

山田 俊郎

A Study on a Human Tracking

- A Measurement Technology of Movement Distance -

Toshio YAMADA

あらまし スマートフォンなどの小型情報端末の普及に伴い、利用者の位置に応じた情報提供サービスが盛んになっている。屋外の測位ではGPSが標準技術となっているが、屋内においては利用シーンによって要求仕様が様々で標準的な技術が確立していない。本研究ではスーパーマーケットの店内を測位空間とし、ショッピングカートの位置を顧客の位置とみなして、その動きから顧客の動線を推定する手法の開発を行っている。本報ではカートを利用した測位システムの概要と試験実装した移動量測定装置について述べるとともに、移動量測定の測定精度について報告する。

キーワード 動線推定、測位技術、内界センサ、サービス工学

1. はじめに

生活空間中の測位技術は、取得される位置情報が様々な情報サービスで活用できるため、社会的関心の高い基盤技術である。現在ではスマートフォン等の高機能な移動体通信端末の普及に伴い、移動中や外出先などデスクトップ環境以外での情報端末の利用が盛んになっており、現在地の近隣の飲食店検索など、位置情報に応じた情報提供サービスが一般化している。

これら移動体通信端末やカーナビゲーションシステムでは、主にGPS情報とマップマッチング技術の併用（移動体通信では基地局情報等も併用）によって、測位を行っており、屋外のナビゲーションにおいては実用上の支障が無いレベルの測位技術が確立したと考えられる。

しかしながら、屋内における測位では、

- ・GPSの電波が届かない
- ・施設の形態によって情報サービスの内容が異なり、要求される位置精度も異なる
- ・一般的に屋外ナビゲーションよりも高い精度が求められる

といった特徴があり、屋外ナビゲーションのようなスタンダード技術が確立していない。Wi-Fiなどの無線電波を用いる方法（インドアGoogleマップ^[1]など）、赤外線などの光通信を用いる方法、ジャイロや加速度計などのセンサを用いる方法^[2]、GPS互換の発信器を用いる方法（IMES）など、さまざまな方法が提案されているが、どの方法にも一長一短があり、利用シーンに合わせて複数

の方法を組み合わせる方向になるものと考えられている^[3]。

筆者は、スーパーマーケットの店内を測位空間として、想定される利用シーンに応じた適切な測位手法やシステムについて研究開発を進めている。本報告では、スーパーマーケットの経営サイドのニーズや将来予想される情報サービスなどを検討して設計したシステム構成を述べるとともに、位置推定の基礎技術である移動量の測定装置の試作、およびその精度検証について報告する。

2. 店舗内の測位手法

2. 1 測位システムの要求仕様

スーパーマーケットで用いる測位システムの設計には、経営者と顧客の両方の視点でシステムの仕様を検討する必要がある。顧客視点でシステムへの要求は、

- ①特別な装置・動作を極力必要としない
- ②動線情報を提供することに対するインセンティブが必要

が主なものである。特に①の条件が煩雑であると顧客にシステムを受け入れてもらえない。しかしながら、顧客が何のアクションも起こさずに動線追跡を行うことは不可能であり、発信器を持つとか、スマートフォンアプリを起動するなどの最小限の動作が必要である。②の条件のインセンティブは、これらのアクションを促すために必要であり、ポイントの付加をインセンティブとして顧客にスマートフォンアプリを起動させ、来店情報を収集

するサービスが行われている^[4]。

一方、経営側へのヒアリングから得られたシステムへの要求は、

- ③売場の棚1本が区別できる位置分解能（50cm程度の位置分解能）
- ④店舗の改変やシステム導入にかかる費用（初期コスト）が少ないこと
- ⑤壊れにくくメンテナンスフリー（ランニングコスト）が少ないこと

が主なものである。③で技術的な要求として、50cmの位置分解能が求められているが、従来の屋内測位技術では実現が困難な分解能である。また、コスト面では、なるべく低コストとなることはもちろんであるが、小規模に導入して効果を確かめながら規模が拡大できる柔軟性も求められる。

2. 2 提案システムの概要

スーパーマーケットの顧客のほとんどはショッピングカート（以下カート）を利用することから、顧客の動線＝カートの動線と捕え、カートの動きを追跡するシステムとした。測位に必要な仕組みをカート上に用意することで、顧客には何ら特別なアクションを要求しないシステムが実現できる。

カートの測位方法は、カートにセンサ類を取り付けて位置を推定する内界センサ方式と、周囲の環境に測位システムを構築する外界センサ方式に大別されるが、本研究では、設備工事や初期コストが比較的少なく、段階的に測位対象台数を拡大することができる内界センサ方式を中心としたシステムを構築することとした。カートには移動量や向きを測定するセンサ類を装備してこれらの情報から位置を推定する（次章で詳細を説明する）。ただし、一般に内界センサ方式による測定は時間とともに誤差が蓄積するため、どこかで誤差を解消する手段が必要となる。このため、施設側にランドマークとなる指標を設置する必要がある。売場通路の両端にRFIDや赤外線ビーコンなど、最小限のマーカ設備の設置を検討している。

また、本研究内では情報提供などの利用者に対するインセンティブについての研究は対象としていないが、将来的にカートの位置情報を利用して、顧客のスマートフォンに情報提供を行うサービスが考えられる。従来の情報提供型の実証実験では、カートに情報端末が設置され

ており、長期の利用ではこれの破損が危惧されていた。破損しやすい情報端末をカートに装着しないため、メンテナンスコストを抑えることができる。

3. 移動量の測定手法

店舗内のカートの位置は、店舗に設定した店舗座標系(X,Y,Z)上の座標として示すことができ、これを時系列でつないだものが動線となる。しかしながら、カートの内界センサから得られる値は図1に示すようなカート固有のカート座標系(X',Y',Z')で定義されている。

カートの動きは、(X',Y')上の並進およびZ'軸周りの回転の3自由度であり、ZとZ'を一致させると、Y'の向きが店舗座標系上のカートの向きとなる。単位時間当たりの(X',Y')上の移動ベクトルをY'の向きに合わせて回転変換させたものを時間積分して位置が計算される。

以下では内界センサを組み込んだ試作カート（図2）を開発した、移動ベクトル測定用のセンサについて述べる。

3. 1 磁気式エンコーダ

一般に車輪の回転量（移動量）の測定にはエンコーダが用いられており、固定された車軸の周辺にセンサを設置する。しかしながら、スーパーマーケットで多く用いられているカートの車輪は4輪とも図3に示すような自由キャスターになっており、車軸がついた部品はフレームパイプを中心に自由に回転するため、車軸にケーブル付きのエンコーダを取り付けることができない。そこで、回転量の測定には非接触式のエンコーダである磁気式エンコーダを用いることとし、磁気センサをキャスターの回転の影響を受けないフレームパイプに取り付ける構造とした。この取り付け方法では、キャスターをフレームパイプに接合するボルトが車輪の近くに位置するため、ボルトの中心にケーブル通す穴をあけ、ボルトの頭に座繰りを入れて磁気を感じ取るホール素子(Allegro A1120)を収納した。一方の車輪側には2個のネオジウム磁石を半周の間隔をあけて埋め込んだ。

ここで設置したホール素子は、図3右のように直径12mmの基板の上に90度回転した方向を向けて4個取り



図1 店舗とカートの座標系



図2 試作カートの外観

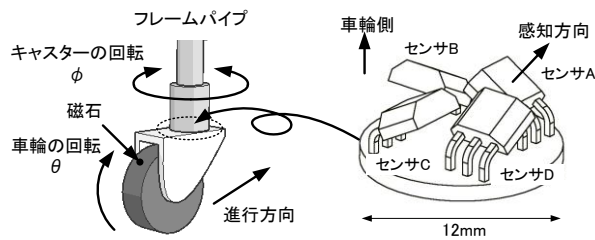


図3 磁気式エンコーダの構造

付けられている。また、センサの感知面は60度程度の角度を取って車輪面に向けてあり、センサ面を下にして接合ボルトの中(図3点線丸印のキャスト内部)に収めた。ホール素子をこのような配置で設置することによって、カート座標系における移動方向(キャストの向き)を得ることが可能となった。

ここで、図3の進行方向を順方向として、センサAの感知方向が進行方向とは逆向きになるようにセンサ基盤を配置する。車輪の回転によって磁石は後方から4つのホール素子に近づき、感知方向が後方を向いているセンサAが最初に反応する。その後、センサD,B,Cと順に反応して、磁石の通過とともにセンサAから順に反応が無くなる(図4-1)(磁力の強度、距離によってはD,B,Cが反応しないこともある)。

次に、進行方向が逆になった場合を考える。自由キャストは車輪がキャストの回転軸からずらしてあるため、進行方向が反転するとキャストがフレームパイプを中心に180度回転する。キャストが回転しても4つのホール素子は回転しないので、進行方向に対して感知方向が逆向きのセンサはセンサCとなり、磁石の接近に伴ってセンサCが最初に反応する。その後、センサB,D,Aと反応して、磁石の通過とともにCから順に反応が無くなる(図4-2)。

横方向移動(キャストが90度回転した場合)も同様に最初に反応するセンサが変わるため、90度単位の4方向の移動方向が測定できる。カートの移動方向のほとんど

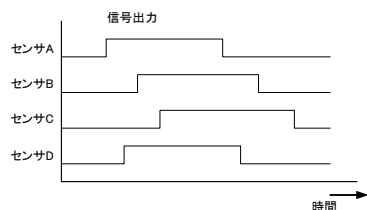


図4-1 順方向移動時のホール素子の反応

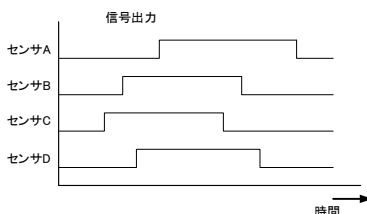


図4-2 逆方向移動時のホール素子の反応

は前方であると考えられるため、移動方向の細かい分解能は必要ではないと考えているが、各センサの反応の時間差から90度単位より細かい分解能で移動方向を求める可能性も考えられる。

3. 2 光学式マウス

光学マウスは、オプティカルフローを測定する光学センサで操作面上の模様を読み取ってマウス本体の2次元移動量を算出する、非接触の移動量測定センサである。マウス内部のセンサ素子は操作面から数mm離れた位置に配置されており、LED光源を含めた光学系はこの位置でフォーカスを結ぶように設計されている。光学系を作り直すことで操作面までの距離を延ばすことが可能であると考え、床面との距離が一定であるカートの移動量測定に適用した。磁気式エンコーダの検出方向は4方向に限られるが、マウスでは全方向の計測が可能である。

マウスの光学センサとLED光源は電子基板上に取り付けられており、レンズと導光プリズムが一体となったプラスチック部品で光学系が構成されている。この光学部品を取り外して電子基板のみとし、光学センサの受光部にボードカメラ用のレンズ(H.P.B OPTOELECTRONICS, MCAN2M_A02, f=6.0mm)を取り付け、カート座標系のZ'軸方向下向きに取り付けた(図5)。レンズの光軸とLED照明の照射軸の角度が近いと床面からの鏡面反射の影響が危惧されるため、LED光源はレンズから水平方向に5cm離れた位置に設置し、床面に対して約70度の角度でレンズ光軸と床面の交点を照射した(光学マウスにおいても角度をつけた照光となっている)。通常のマウスに比べて移動測定面までの距離が離れているため、8個の赤色LEDにより床面を照光したが、十分な明るさのもとでは周囲の環境光のみで移動量の測定が可能であった。

4. 測定実験および考察

開発した2通りの移動量測定装置の測位性能を試験するため、直線移動時の測定誤差について検証を行った。

床面がビニール床(模様あり)とカーペット(無地)の直線廊下に距離20m測定区間を設け、この間を往復して磁気エンコーダおよび光学マウスのカウント数を測定

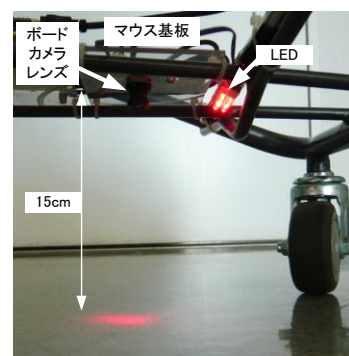


図5 光学マウスを利用した移動量センサ

した。その結果を表1, 2に示す。移動条件は通常歩行（時速3km程度）と速足歩行（時速5km程度）の2通りで、移動方向はカートの前後方向（Y'軸方向）および横方向（X'軸方向）の2通りである。

測定距離20mを平均カウント数で割ったものを距離分解能であるとみなし、カウントの標準偏差を距離換算すると、同一の測定条件下ではほとんどの条件において10cm程度の範囲に入っている。これは20mに対して0.5%であり、同一条件下の繰り返し精度は高いといえる。特に、磁気式エンコーダではほとんどの場合において標準偏差が1カウント以下となっている。

次に、センサの方向依存特性を検証するため、両方向のカウント数を用いて統計処理を行ったところ、ほとんどの条件下で一方方向のみの移動の場合より標準偏差が大きくなり、方向依存性があることが示された。光学式マウスの場合は、照明の当たり方や光学センサの特性が原因であると考えられるが、磁気式エンコーダは装置の原理上方向依存性が発生することが考えにくいため、原因についてはさらなる検証が必要である。

また、すべての条件下の全試行結果を対象とした統計処理を行うと、距離換算の標準偏差は磁気式エンコーダの場合で33.71cm, 光学マウスの場合で44.84cmであった。20mの測定距離に対する割合はそれぞれ1.7%, 2.2%であり、スーパーマーケット店内の測位に要求される測位精度（売場の棚1本の識別：50cm分解能）を満足するものといえる。

5. まとめ

スーパーマーケットの顧客動線の取得を目的とした屋内測位システムの構築手法として、カートを利用した測位システムを提案した。提案システムの要素技術のうち、カートの移動量測定について磁気式エンコーダによる方法と光学マウスを利用した方法を実装して測定精度の評価を行い、内界センサ方式による測位で実用レベルの精度が得られることを確認した。

今後は、カートの向きを用いて2次元上の測位システムに発展させるとともに、累積誤差をリセットするための基準位置マーカーについても開発を行う。また、実際のスーパーマーケットでの実フィールド実験も視野に入れたシステム開発を行う。

文 献

- [1] “モバイルGoogleマップの新境地、構内地図が見られるようになりました”, Google公式Blog 2011年11月30日, <http://googlejapan.blogspot.com/>, 2011.
- [2] 石川智也, 興沼正克, 蔵田武志, “サービス現場での従業員トラッキングシステムの評価と応用”, 日本VR学会論文誌, Vol.16, No.1, pp23-33, 2011.
- [3] “活用始まる屋内測位 高精度化で広がる用途”, 日経エレクトロニクス2-20 No.1076, pp.65-71, 2012.
- [4] “smapo”, <http://smapo.jp/>

表1 磁気式エンコーダによる移動量測定結果 (20m直線移動)

床面	ビニール床									カーペット床			全条件
移動条件	通常歩行			速足歩行			通常歩行			通常歩行			
移動方向	+Y'	-Y'	両方向	+Y'	-Y'	両方向	+X'	-X'	両方向	+Y'	-Y'	両方向	
試行回数	10	10	20	4	4	8	5	5	10	15	15	30	68
平均カウント数 (count)	169.1	169.9	169.5	168.8	170.3	169.5	170.2	166.6	168.4	173.3	165.4	169.3	169.3
平均分解能 (cm/count)	11.827	11.772	11.799	11.852	11.747	11.799	11.751	12.005	11.876	11.543	12.092	11.811	11.816
標準偏差 (count)	0.57	0.88	0.83	0.50	0.50	0.93	0.45	1.52	2.17	0.59	0.63	4.05	2.85
標準偏差 (cm換算)	6.71	10.31	9.76	5.93	5.87	10.92	5.26	18.21	25.78	6.85	7.65	47.78	33.71

表2 光学マウスによる移動量測定結果 (20m直線移動)

床面	ビニール床									カーペット床			全条件
移動条件	通常歩行			速足歩行			通常歩行			通常歩行			
移動方向	+Y'	-Y'	両方向	+Y'	-Y'	両方向	+X'	-X'	両方向	+Y'	-Y'	両方向	
試行回数	10	10	20	4	4	8	5	5	10	15	15	30	68
平均カウント数 (count)	20949	21765	21380	21572	21058	21295	21280	21985	21672	21711	22349	22030	21689
平均分解能 (cm/count)	0.095	0.092	0.094	0.093	0.095	0.094	0.094	0.091	0.092	0.092	0.089	0.091	0.092
標準偏差 (count)	88.90	195.88	443.70	112.61	74.59	306.00	86.73	56.91	379.20	105.44	109.25	341.27	486.25
標準偏差 (cm換算)	8.49	18.00	41.51	10.44	7.08	28.74	8.15	5.18	35.00	9.71	9.78	30.98	44.84

IEによる作業工程分析及び可視化手法の研究

曾賀野 健一 渡辺 博己 棚橋 英樹

Research of Workflow Analysis and Visualization for IE

Kenichi SOGANO Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI

あらまし セル生産等の作業現場では、経済的かつ生産性（作業効率）を高めるための作業カイゼンが求められているものの、人件費等の問題からカイゼン活動が停滞し、標準的な作業能力（時間時間等）を把握できていない企業が大半を占めている。そこで、動作計測・解析技術（映像等から人の動きを計測・解析する技術）等を用いて、簡単かつ廉価に作業ごとの時間を計測し解析できるツールの開発を目標とする。さらに、セル生産等の作業現場において用いられる立体的（3次元空間）領域での動作計測・解析を可能とするための手法を確立する。

本年度は、動作計測用装置の選考及び特性の調査、動作特徴量抽出手法の検討を行った。

キーワード 映像、動作解析、作業時間、カイゼン、3次元空間

1. はじめに

セル生産等の作業現場では、急激な少子高齢化による労働力人口の減少と多品種少量生産の増加に伴い、限られた生産投入資源（人、機械等）を有効活用し、経済的かつ生産性（作業効率）を高めるための作業カイゼンが求められている^[1]。

作業カイゼンや作業設計を目的とした作業分析は、IE（Industrial Engineering）と呼ばれる工学的手法が用いられることがあるが、これは「人、モノ、設備及び情報を統合し、最も経済的な仕事のシステムを設計、改善、確立すること」を意味しており、作業員一人あたりの生産性を高めるには、作業員に無駄な動きをさせてはならないという発想に基づいている^[1]。IEは、作業研究として作業工程に費やす時間等を計測分析し、標準的な作業能力の算出、人件費等の原価管理、作業負担の軽減や効率化を図るためのツールとして用いられる^[2]。

しかしながら実際の作業現場では、現状を分析するため作業時間等を人がストップウォッチ、ビデオ等を用いて作業を計測・観察する必要がある。この作業には膨大な時間と手間を要し、計測技術を有する人材の育成、人件費等の問題からカイゼン活動が停滞し、標準的な作業能力を把握できていない企業が大半を占めている^[3]。また、人による時間計測では、長時間、長期にわたる作業時間の計測が困難なため、時間帯や人による作業のムラ等を評価するまでには至っていないのが実状である。

そこで、動作計測・解析技術（映像等から人の動きを計測・解析する技術）等を用いて、簡単に作業ごとの時間を計測し解析可能なツールの開発を目標とする。

動作計測・解析技術については、これまでに当研究所において研究開発を進めてきており^[4-6]、自動車保安部品

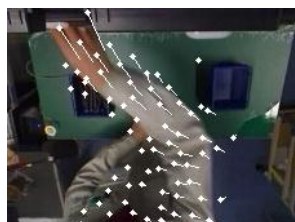
のネジ締め作業や梱包作業の現場において検証を行い、その有効性を示してきた。しかしながら、これまでの動作計測・解析技術では作業工程ごとに要する時間を自動計測することはできない。また、平面的な作業領域に対する動作にしか対応できない点に解決すべき課題が残されている。作業の対象領域を2次元平面から3次元空間に拡張することができれば、作業領域が拡大化・複雑化している作業現場への適用範囲がさらに広がると考えられる。

2. 従来の動作計測・解析技術

従来の動作計測・解析技術は、画像から顔や手等の注目部位を切り出す手法ではなく、オクルージョンや作業者の服装の変化、照明変化等の影響を受けにくい局所特徴の統計量を用いるアプローチ^[7]とした。具体的には、局所的な動きベクトルとしてオブティカルフローを用い、その統計量である動作の大きさと方向分布を表す方向ヒストグラムを動作特徴量として用いている。

方向ヒストグラムは、まず図1に示すように画像中の注目画素点の動きベクトル（大きさと方向）を求め、方向別に分類する。画像を構成する画素が格子状に配列されていることから、図1(b)に示すように方向分割数を8と考え、各動きベクトルを8方向に分類、方向ごとに動きベクトルの大きさの和をとって得られる方向ヒストグラムを作成し、動作特徴量とした。

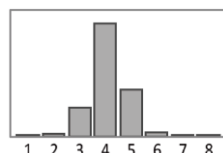
図1(a)の例では、右下方向から左上方向への動作ベクトルが多いため、方向4が大きい値となる方向ヒストグラム（図1(c)）が生成される。作業等の映像データから動作を分割する考え方や動作特徴量の抽出方法等、詳細については、過去の報告を参考されたい^[4-6]。



(a) 取得画像とそのオプティカルフローの例



(b) 方向の8分割



(c) 方向ヒストグラム

図1 方向ヒストグラムの例

IEの分野では、仕事のレベルが階層的に表現され解析される^[2]。動作解析を行うにあたって、図2に示すように仕事のレベルを3つの階層（単位工程層、作業層、動作層）に分けて考えている。

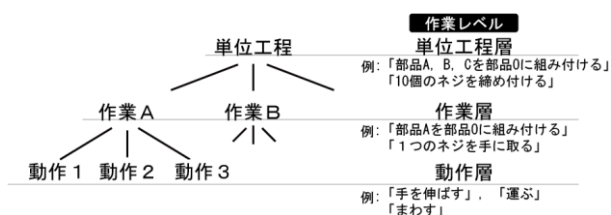


図2 作業の階層構造

単位工程層は、1つの作業場において「部品A、部品B、部品Cの順に部品Oに組み付ける」、「10個のボルトを締め付ける」等の1つの組み付け部品に対して行う一連の作業を意味する。作業層は、「部品Aを部品Oに組み付ける」、「部品Bを部品Oに組み付ける」等の目的行動の最小単位であり、最下層の動作層は、「手を伸ばす」、「運ぶ」、「まわす」等の基本的な動作である。

動作解析では、図3に示すように1つの単位工程に対して撮影した映像を画像処理により動作層の動作単位に分割することで単位工程を動作層で記述する。

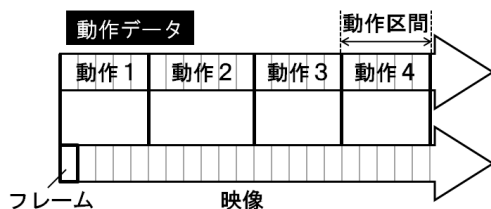


図3 作業と映像の分割

3. 3次元空間への拡張と時間の自動計測

前章で述べた動作計測・解析技術は、2次元平面の作業領域に対する動作にしか対応できない。さらに、作業

工程ごとに要する時間を自動計測することができない。

作業の対象領域を2次元平面から3次元空間に拡張することにより、作業領域が拡大化・複雑化している作業現場への適用範囲が広がると考えられること、また作業工程に費やす時間を自動計測することにより、限られた生産投入資源である人的労力を割くことなく工程能力の算出や作業の効率化を図るための情報を取得することが可能となる。

3次元空間の動作解析を実現するためには、従来の2次元平面における方向ヒストグラムを用いた動作特徴量（方向と大きさ）のみでは不可能であり、3次元空間の情報を取得するための撮影方法（装置）及び動作計測・解析手法を検討する必要がある。

複数台の撮影装置を用いる方法が考えられるが、ハードコストの増加や作業対象領域（撮影領域）の位置決め、撮影同期の調整等に手間を要する問題がある。

そこで本研究では廉価かつ簡単な機器構成を考慮し、図4に示すようなKinectセンサ（Microsoft社製）を候補として選考した。Kinectセンサは1台で画像及び距離（深度）データをリアルタイムに取得することが可能であることから、2次元平面の画像情報に加えて人体までの距離情報を同時に取得することが可能である。動作の認識範囲（奥行）は室内において800mm～3,500mmであり、センサ本体の価格は約1万5千円である。



図4 Kinectセンサ

Kinect センサは人の位置や動き等も認識することができるが、パソコンと Kinect センサを接続し制御するためには元々公式のドライバ等が公開されていないためオープンソースや無料のドライバを利用する必要がある。パソコンから Kinect センサを制御し、画像及び距離データを取得するためのプログラムは自作する必要がある。

本研究では、オープンソースであるOpenNI（Kinect開発元が提供するドライバ・ライブラリ）を利用した。OpenNI は、Windows XPやVisual Studioの旧バージョンにも対応しており利便性を有している。

Kinect センサの距離計測精度を確認するため Kinect センサから壁平面までの距離を計測した。全画素（画像サイズ：640×480pixel）について平均（Average）と分散（Variance）を求めた結果、Kinect センサー壁面間距離が

約 1,000mm の場合において平均 994.6mm, 分散 54.3mm という結果であった。距離計測精度としては良好な結果であると思われる。

4. 動作特徴量抽出手法の検討

Kinectセンサから取得した距離データを用いて3次元空間における動作計測・解析に拡張するための手法について2通りの検討を行った。

4. 1 最小距離（深度）の参照

1つ目の手法は、Kinectセンサから取得した距離情報（Depthマップ）から作業領域における最小距離を参照するものである。具体的には、Kinectセンサから取得したDepthマップに関して、フレームごとに距離の最小値を抽出し、フレーム間差分を計算する。そして動作単位ごとにフレーム間差分の和を求め、この数値を2次元平面とは別次元（距離方向）の動作特徴量として扱う。

一方、2次元平面の作業領域における動作計測・解析については、KinectセンサからDepthマップと同時に取得したRGB画像を参照することで行う。具体的には、Kinectセンサから取得したRGB画像に関して、映像の連続する2つのフレーム画像についてオプティカルフローを検出する。得られた方向ベクトルを8方向に分割し、動作単位ごとに各方向のベクトル量の和を計算する。この数値を2次元平面における動作特徴量として扱う。さらに動作単位に分割する際に時間を抽出し、動作単位ごとに時間を出力する。

そして、予め標準作業手順として登録した動作特徴量と評価作業の動作特徴量を比較することにより、動作単位ごとに作業の種類及び時間を出力する。2次元平面における動作特徴量の比較は、登録作業と評価作業の動作単位ごとに動作特徴量（8方向ベクトル）の類似度を余弦で求め、閾値処理を行う。距離に関する動作特徴量の比較は、登録作業と評価作業の動作単位ごとに動作特徴量（最小距離のフレーム画像間差分和）を求め、閾値処理を行う。

動作解析のフローを図5に示す。

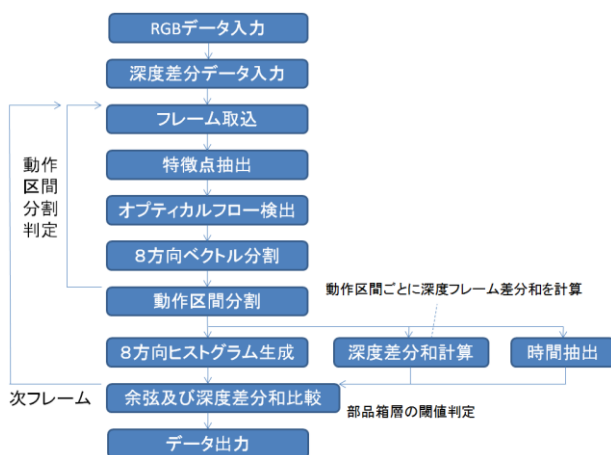


図5 動作解析フロー（最小距離の参照）

4. 2 特徴点の参照

2つ目の手法は、Kinectセンサから取得したRGB画像に関してオプティカルフローを検出する際に、特徴点の位置（座標）からDepthマップを参照することで距離情報を取得するものである。

具体的には、図6に示すように映像の連続する2つのフレーム画像からオプティカルフローにより特徴点の位置（座標）を抽出する。次に、KinectセンサからRGB画像と同時に取得したDepthマップにおいて特徴点座標に合致する座標の距離情報を取得する。

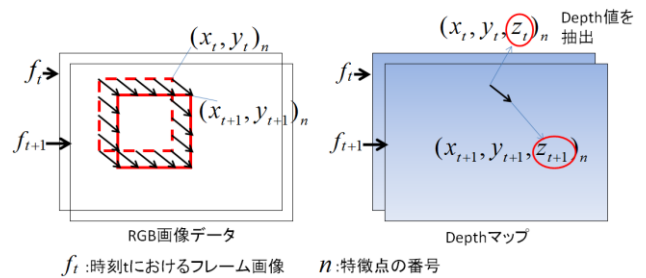


図6 特徴点の距離（Depth）データ参照

次に、すべての特徴点について動作単位ごとにフレーム間の距離差分の総和を算出する。この数値を2次元平面とは別次元（距離方向）の動作特徴量として扱う。

2次元平面の作業領域における動作計測・解析については前節と同様であるため省略する。距離に関する動作特徴量の比較は、登録作業と評価作業の動作単位ごとに動作特徴量（特徴点距離のフレーム画像間差分和）を求め、閾値処理を行う。

ただし、この手法は距離情報が特徴点の数に影響を受けやすいこと等の問題を有していることから、さらなる検討が必要である。

5. 実験

前章の検討を行った結果、フレーム画像の最小距離を参照する手法について有効性を検証するため、実験を行った。

まず、Kinectセンサを用いて3次元空間における動作計測を行うための作業環境を検討した。図7に示すようにセル生産等の作業現場において部品の組み立て作業等で用いられる作業架台を用意した。

Kinectセンサ、作業台、部品箱等の配置は図7の構成とした。作業者の手や腕が動く範囲を画像の注目領域として捉える方法を検討するため、Kinectセンサは作業者の前上方から作業台に向けて設置し、Kinectセンサから作業台までの距離は1,200mmとした。部品箱は上段と下段の2段に分類し、各段にはそれぞれ3つの部品箱を配置した。各部品箱の間隔は300mmとした。

従来の2次元平面における作業領域の動作解析では、「部品①を取りに行く」と「部品④を取りに行く」動作は

同じと判定されて評価できない問題が残されていたが、本研究ではこの問題を解消するものである。

作業領域における距離の最小値をKinectセンサから取得したDepthマップからフレームごとに抽出し、フレーム間差分を求める。この最小距離のフレーム間差分を部品箱（上段）と部品箱（下段）の区別を行う際の動作特徴量として扱う。

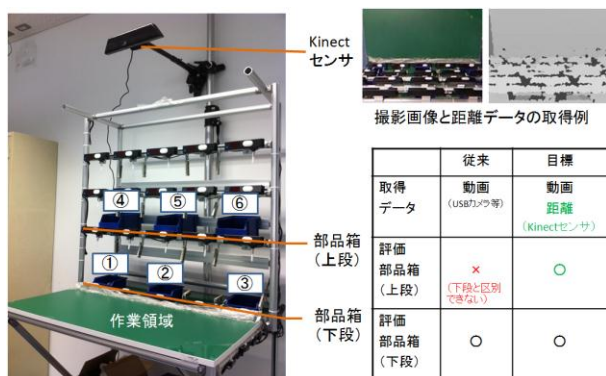


図7 作業領域とKinectセンサ等の配置

次に、KinectセンサからRGB画像及びDepthマップ（距離情報）を取得するための録画プログラムを試作した。開発環境は、OS：Windows7 Professional，統合開発環境：Visual Studio2008（C++），ドライバ：OpenNIを用いた。録画データの出力形式は、RGB画像をAVI形式，距離情報をCSV形式とした。

以上の環境において実験を行った。対象とした作業は、図7において「部品①を取りにいく」→「部品①をもってくる」→「部品②を取りにいく」→・・・→「部品⑥をもってくる」の作業（動作単位）を各部品箱について10回行った。

KinectセンサからDepthマップの各フレームの最小距離を取得後、動作単位（部品①を取りにいく等）ごとにフレーム間差分の和を計算した。結果は、部品箱（上段3箱）の平均196.6mm，分散21.4mmに対して、部品箱（下段3箱）の平均65.2mm，分散21.3mmであった。

部品箱（上段）と部品箱（下段）では、フレーム間差分の和（平均）に131.4mmの差が生じたことから、閾値処理による部品箱（上段）と部品箱（下段）の区別は可能であると考えられる。

なお、部品箱（上段3箱）の平均196.6mmは各部品箱の間隔を300mmとした割にやや低い数値と思われるが、これは「部品①を取りにいく」時点で作業領域に手を置いているため、手甲の最小距離を取得しているためである。また逆に、部品箱（下段3箱）の平均65.2mmはやや大きい数値であると思われるが、これは「部品①を取りにいく」過程で手がやや浮き上がる動作となることに起因している。

6. まとめ

セル生産等の作業現場における経済的かつ生産性（作業効率）等を高めるための作業カイゼンを支援する廉価かつ簡単な作業時間計測・解析ツールの開発及び作業評価領域に関して2次元平面から3次元空間への拡張を目標とし、動作計測装置及び動作計測方法の検討を行い、その候補として、装置1台で画像及び距離データをリアルタイムに取得することが可能なKinectセンサに注目し、その特性を調査した。

Kinectセンサの距離計測精度を調査したところ、良好な結果を得たことから、Kinectセンサを用いて3次元空間の作業評価を行うための動作特徴量抽出手法について2通りの検討を行った。その検討をふまえて、Kinectセンサから取得したDepthマップ（距離情報）から最小距離を参照する手法について有効性を検証するため、作業環境を構築したうえでRGB画像及びDepthマップの録画プログラムを試作し実験を行った。

実験の結果、動作単位ごとに部品箱（上段）と部品箱（下段）の区別が可能であることを示し、3次元空間において作業評価を行うための動作特徴量抽出手法として有効性を示した。

謝 辞

本研究への助言、御支援・御協力を頂きました皆様に感謝致します。

文 献

- [1] 鈴木準，“IEを活用した現場改善のススメ”，ロジスティクス・ビジネス，2005.
- [2] 藤田彰久，“IE の基礎”，建帛社，1997.
- [3] 水野芳昭，“ムダの発見・排除によるヒト，モノ，カネの有効活用”，カイゼン推進研修，2010.
- [4] 清水早苗，平湯秀和，浅井博次，“映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発－締め付け作業への適用－”，岐阜県情報技術研究所研究報告第10号，pp.1-6，2007.
- [5] 松原早苗，渡辺博己，棚橋英樹，“映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発－汎用的な作業への拡張－”，岐阜県情報技術研究所研究報告第11号，pp.21-26，2008.
- [6] 曾賀野健一，渡辺博己，松原早苗，棚橋英樹，“映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発－梱包作業への適用－”，岐阜県情報技術研究所研究報告第12号，pp.13-18，2009.
- [7] T.Kobayashi and N.Otsu, "Action and Simultaneous Multiple Persons Identification Using Cubic Higherorder Local Auto-Correlation", Proc.ICPR, 2004.

非接触三次元計測システムの測定方法の検討

久富 茂樹

Consideration of a Measuring Method for Integration of Non-contact 3D Scanning Data

Shigeki KUDOMI

あらまし 当研究所において、非接触三次元計測システムを使用した形状測定を行う際、厚みのない板状の被測定物では、厚さ方向の位置合わせが正確に行われず、正しい形状データが取得できないという事例が多いことがわかってきた。これは、複数に分けて測定したデータを位置合わせする際に、板状の被測定物では厚さ方向のデータ量が少なく、また、エッジ部分のデータは欠落することが多いため、正しく位置合わせできないためだと思われる。そこで、被測定物の周囲にマーカを置き、マーカも同時に測定し位置合わせすることで、厚さ方向の情報を付与する方法を試した。被測定物を取り囲むようにマーカを配置して測定することで、厚みのない板状の被測定物の場合の位置合わせ精度を向上させることができた。

キーワード 非接触、三次元形状、マーカ、位置合わせ

1. はじめに

当研究所では、三次元形状データを取得するために、可搬型の非接触三次元計測システム（コニカミノルタ製：RANGE7）を導入している。図1にシステムの外観と測定例を示す。本システムは、レーザ光源とCCDカメラを備えており、レーザ光を被測定物に照射し、被測定物上の光の点をCCDカメラで撮影する。このときのレーザ照射角と点の画素位置から被測定物の三次元位置を計算で求めている。1回の測定で、200 [mm]×200 [mm]程度の範囲の測定が可能である。回転テーブルなどを利用して、被測定物を適宜回転させ、複数回測定し、ソフトウェアによる位置合わせを行うことにより、被測定物の全周の三次元データを取得することができる。門型の三次元測定機のような測定精度は期待できないが、簡単な操作で手軽に形状データが取得できることが特徴である。また、装置が小型軽量であるため、持ち運びも可能である。県内外の企業のかたにも有料で設備開放しており、形状測定、モデリングなどに多く活用いただいている。

本システムを使用して、様々な形状のものを測定しているなかで、板のような厚みのない形状のものを測定すると、厚さ方向の位置合わせが正しく行われず、実際の厚さと異なる事例が多いことがわかってきた。これは、複数に分けて測定したデータを位置合わせする際に、板状の被測定物では厚さ方向のデータ量が少なく、エッジ部分のデータは欠落することが多いため、正しく位置

合わせできないためだと思われる。そこで、本報では、被測定物を取り囲むようにマーカを置き、マーカも同時に測定し、位置合わせする方法を試したので報告する。

2. マーカを使用した測定方法

被測定物として、図2に示すようなL字アルミ部材を使用した。金属光沢面での測定の不具合を避けるため、試料全体に、つや消し塗料を均一にスプレーした。塗料スプレー後の板厚をマイクロメータで測定したところ、2.03 [mm]であった。この情報を基に、図3に示すように、基準となる形状データをCADで作成した。測定データをこの基準データと比較することにより、測定精度を評価することにした。

測定は、マーカを配置しない状態（図2）、被測定物の左右に1個ずつマーカとなる粘土を配置した状態（図4）、



図1 非接触三次元計測システムと測定例

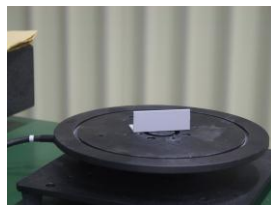


図2 被測定物

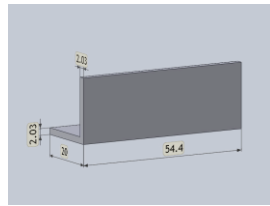


図3 基準データ

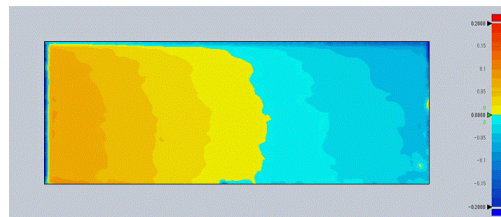


図6 マーカなしの場合の測定結果

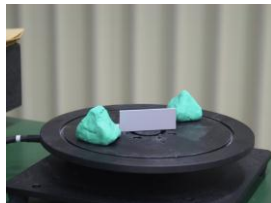


図4 マーカ2個配置

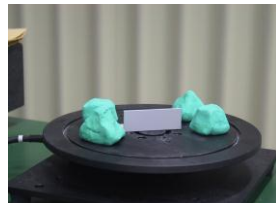


図5 マーカ4個配置

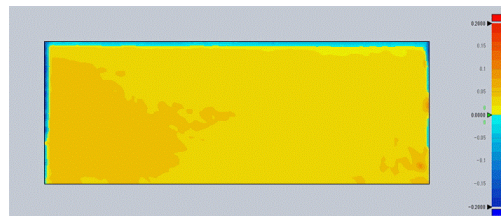


図7 マーカ2個の場合の測定結果

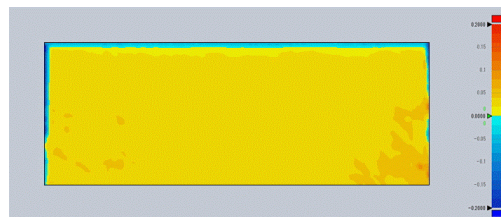


図8 マーカ4個の場合の測定結果



図9 測定距離700[mm]の場合の測定結果

被測定物を囲むようにマーカの粘土を4個配置した状態（図5）の3つの条件で行った。カメラと被測定物との距離（測定距離）は、システムの仕様上、450 [mm]～800 [mm] の範囲に設定しなければならないが、距離が短いほど測定精度が高くなるため、485 [mm] になるように配置して測定を行った。マーカを4個配置した条件については、参考のため、測定距離を700 [mm] にした場合の測定も行った。回転テーブルに被測定物とマーカを置き、30度ずつ回転させながら1周測定を行い、12回分の測定データを取得した。モデリングソフトウェア（INUS Technology 社製：RAPIDFORM XOR）を使用して、12回分のデータをマーカも含んだ状態で位置合わせを行い、1つのデータに統合した。その後、マーカ部のデータを削除し、検査用ソフトウェア（INUS Technology 社製：RAPIDFORM XOY）を使用して、先に作成した基準データとの偏差を調べ、測定、位置合わせ精度を確認した。

3. 測定結果

測定データと基準データを垂直板部の裏面を基準として位置合わせを行い、表面の偏差を調べた。偏差を色分けした結果を図6～図9に示す。カラースケールで上端、下端にある色の方が偏差が大きいことを示す。マーカを用いない場合は、図6に示すように、左右で偏差が異なり、傾いて位置合わせされていることがわかる。マーカを2個使用した場合の結果を図7に、マーカを4個使用した場合の結果を図8にそれぞれ示す。これらの場合は、左右で大きく傾くことなく位置合わせが行われている。今回の測定では、基準データよりも若干厚めに測定された。基準データとの偏差は、マーカを2個使用した場合が0.06 [mm] 程度で、マーカを4個使用した場合が0.04

[mm] 程度であり、マーカを4個使用した場合のほうが精度よく測定することができた。図9はマーカを4個使用し、測定距離を700 [mm] にしたときの結果である。この場合も左右で大きく傾くことなく位置あわせがなされているが、基準データとの偏差は0.07 [mm] 程度と大きくなっている。装置の原理上、測定距離が長くなると測定精度が低下するため、偏差も大きくなったと思われる。

4. まとめ

非接触三次元計測システムによる厚みのない被測定物の測定において、被測定物を囲むようにマーカを置いて測定し、マーカの情報を利用して位置合わせを行う方法を試した。データ量の少ない厚さ方向に対してマーカの情報を利用することで測定の精度を高めることができた。

溝を有する飯碗の落下試験シミュレーション

横山 哲也

伊藤 正剛*

横山 貴広*

Simulation of Drop Test for Rice Bowl with Slot

Tetsuya YOKOYAMA

Sadataka ITO

Takahiro YOKOYAMA*

あらまし 高齢者の感覚や身体特性を考慮した人に優しい陶磁器製品の開発において、落下時の割れを誘導する飯碗の研究開発を行っている。本報では落下衝撃時に、溝がある飯碗と溝がない飯碗とで応力の比較を行うため、落下シミュレーションを行った。その結果、割れを誘導する溝近辺では、割れを誘導する溝がない飯碗より応力が高くなることを確認した。

キーワード 落下試験, CAE

1. はじめに

高齢者の感覚や身体特性を考慮した人に優しい陶磁器製品開発を目的に、伊藤らは割れても後片付けしやすい飯碗の研究開発を行っている^[1]。飯碗の側面に溝を彫りこむことで、落下時の割れを誘導する仕組みであり、割れ誘導線の本数に応じて破片形状がどのように変化するか、落下試験を行い、その傾向を解析している。

陶磁器の破壊は脆性破壊が主であり、最大主応力が引張り強度を超えることで初期亀裂が生じ、亀裂が進展する。割れ誘導線を設計するにあたり、落下時の応力分布を把握することは重要なことである。そのため、落下時の飯碗のひずみを測定することは、割れ誘導線を設計にあたり必要な過程となる。しかしながら、落下試験の歪を測定するのは計測上困難である。そこで本報ではCAEソフトを用いて、割れ誘導線を有する飯碗の落下シミュレーションを行い、割れ誘導線と最大主応力の関係を求めた。

2. 解析方法

2. 1 飯碗の形状および材料

図1に飯碗の形状を示す。飯碗の縁の直径は120[mm]、高さは65[mm]、厚みは4[mm]であり、飯碗の側面には割れを誘導するための溝が鉛直方向と水平方向に彫られている。溝の深さは厚みの1/2で、溝幅は3[mm]である。

飯碗の材料物性値はヤング率 $7.7E10$ [Pa]、ポアソン比0.174、密度 $2,450$ [Kg/m³]の純物質とした。

2. 2 落下試験条件

図2(a)に示すように、飯碗を高さ70[cm]の位置から剛体の床に落下させる。この時、飯碗の縁が床での打点となるように、 45° の傾斜をつけ落下させる。また、図2(b)に示すように、割れ誘導線間が打点となるように飯碗の姿勢を決めた。

2. 3 解析条件

使用する商用CAEソフトはSolidWorks Simulation 2010で、有限要素法を用いて飯碗の動特性を計算する。飯碗

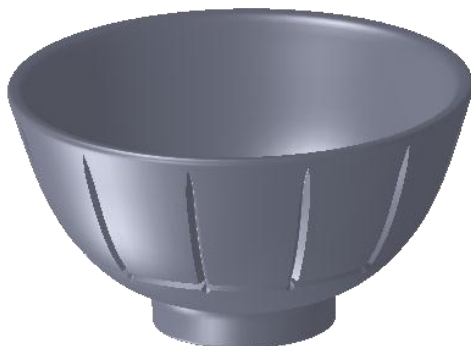
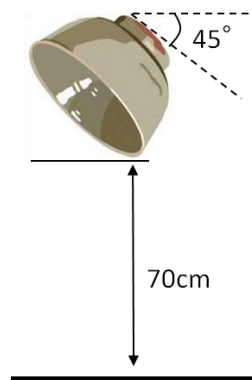
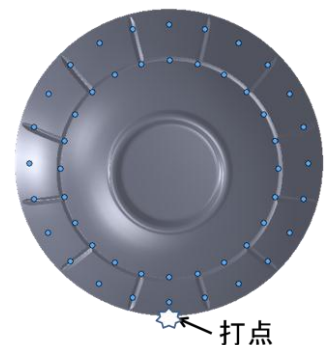


図1 割れ誘導線を有する飯碗



(a)落下試験条件



(b)応力算出箇所(12本)

図2 解析条件

* 岐阜県セラミックス研究所

の変形は微小であることから、線形の有限要素法を利用する。有限要素は2次の4面体として、メッシュ形状が計算結果に与える影響を抑えた。また、要素サイズは飯碗の厚みの半分を目安に平均2[mm]とした。解析時間は飯碗が床に衝突してから1[msec]の間とする。なお、シミュレーションの1周期はクーラン条件から算出した。

シミュレーションを用いて、割れ誘導線の有り無しの飯碗で応力の比較を行うことから、同じ箇所の応力を測定する必要がある。そのため、応力を測定する箇所は、溝形状の影響を受けない内側とする。図2(b)は割れ誘導線12本の飯碗外側の形状であるが、応力測定箇所は○で示す割れ誘導線近辺（裏）と、割れ誘導線間の15°刻みとした。

3. 解析結果

割れ誘導線の有無による飯碗に働く最大主応力を比較する。まず、割れ誘導線が12本の飯碗と、割れ誘導線がない飯碗（以下、割れ誘導線0本）で、最大主応力の比較を行った。図3, 4に、打点から75°までの縁部近くに働く最大主応力の時系列データを示す。割れ誘導線12本を実線、0本を破線で示す。割れ誘導線間では12本、0本での応力の差はないが、割れ誘導線裏側では、応力の増加が認められる。また、縁部近くの割れ誘導線裏側すべてで応力は増加していた。なお、腹部の最大主応力は、縁部に比べて小さい値であった。

割れ誘導線12本を有する飯碗落下試験シミュレーションの最大応力分布図（衝突後200[usec]）を図5に示す。応力の大きさをグレースケールで表示し、応力が高くなると色が濃くなる。図から、打点とその近くの割れ誘導線および打点から135°にある割れ誘導線近辺の応力が高いことがわかる。135°の応力が高くなるのは、飯碗の形状に関係があると推測される。

次に割れ誘導線16本と0本の飯碗の比較を行った。傾向としては12本と同様であるが、一部、縁の割れ誘導線裏側において応力の増加がない箇所が存在した。これは左右反対側においても同様な傾向が見られたことから、形状に依存するものと考えられる。

4. まとめ

本報では、落下時の割れを誘導する飯碗の割れ誘導線を設計するにあたり、落下時の応力分布を把握するため落下衝撃シミュレーションを行った。その結果、割れ誘導線を有する飯碗は、溝がない飯碗と比較して、割れ誘導線近辺で応力が増加することを確認した。しかし、全ての誘導線近辺では応力が増加しておらず、それは誘導線を含めた全体形状に依存しているものと考えられる。

今回は、落下試験時のひずみ計測が難しいことから、CAEを用いてシミュレーションを行った。シミュレーシ

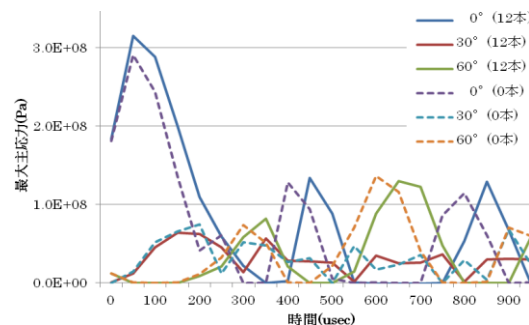


図3 割れ誘導線間（0° ,30° ,60°）の最大主応力

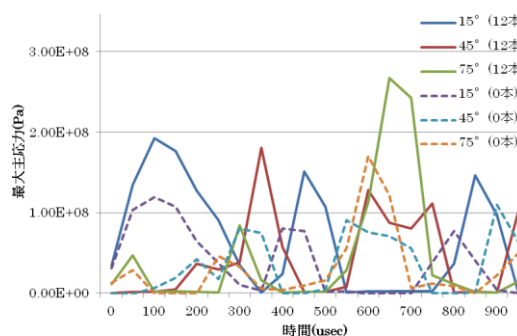


図4 割れ誘導線裏（15° ,45° ,75°）の最大主応力



図5 落下時の応力分布（衝突後200[usec]後）

ョン結果の検証について、通常は簡単なモデルに置き換えて理論式の結果と比較して行うが、今回のケースは拘束箇所がなく衝撃荷重がわからないことから検証はできなかった。ただし、今回の解析は傾向を把握するには目的を達していると考えられる。

今回のシミュレーションは材料が破壊しない前提での応力を測定したものであり、亀裂の進展まで推定することはできない。今後は、亀裂の進展まで考慮したシミュレーションが必要となる。

文 献

- [1] 伊藤正剛ら，“岐阜県セラミックス研究所研究報告”，p13-15, 2010.

カメラ画像とCADデータの重畳表示

横山 哲也

Superimposed Display of CAD Data on Camera Image

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 実空間を撮影したカメラ画像に、3次元CADデータを表示することは、実空間と製品との位置関係の検討等ができるなど、有効な手段である。ただし、カメラ画像にCADデータを表示する際は、カメラ画像の遠近感にCADデータの奥行き等を合わせる必要がある。また、曲面を有するCADデータの表示も必要となる。そこで、カメラパラメータとOpenGLを用いて、カメラ画像上に3次元モデルの表示を行ったので、本報ではその内容を報告する。

キーワード OpenCV, OpenGL, IGES, NURBS

1. はじめに

近年、3次元CADの普及に伴い、デジタルデータを用いた評価が可能となっている。3次元CADデータの評価手法として、カメラ画像上にCGを表示することで、使用環境中における製品の見栄えを評価することができる^[1]。また、画像上のモデルと重畳表示したCADデータの位置関係を検討できるなど、画像上にモデルを重畳表示することは設計手法に有効なツールになると考える。

3次元CADデータをカメラ画像上に表示する際、モデルの位置合わせにとどまらずモデルの奥行きの遠近感を、カメラ画像上の遠近感に合わせる必要がある。また、多くの工業製品は曲面を有することから、曲面の表示も重要となる。そこでデジタルカメラで撮影した画像上に、曲面を有するCADモデルの重畳表示を行ったので、本報ではその内容について報告する。

2. カメラ画像上への3次元モデルの表示

本報では、テクスチャマッピングでカメラ画像を背景とし、3DグラフィックスライブラリOpenGLを用いて3次元モデルを表示する。表示にあたり、カメラ画像での奥行きは透視射影であるから、OpenGLを用いて透視変換された3次元モデルを表示する。また、カメラ画像上のカメラ視点から見た3次元モデルを表示する必要がある。そのため、カメラで画像を撮影した際のカメラの位置姿勢、焦点距離、撮像中心等のパラメータが必要となる。本報ではこれらカメラのパラメータを、画像処理ライブラリOpenCVを利用して算出した。

算出したカメラパラメータとOpenGLを用いて、図1に示

す手順で3次元モデルを表示する。カメラの焦点距離、撮像面中心とレンズ中心から射影行列を作成。レンズ中心と撮像面中心がずれているため、透視変換はglFrustum()関数を使用した。視野変換については、カメラの位置姿勢を用いてモデルビュー行列を作成した。

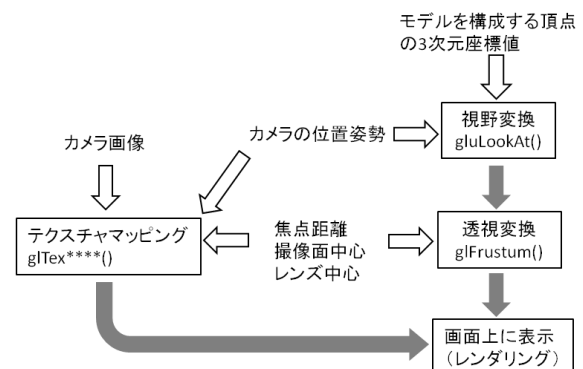


図1 OpenGLでの表示処理

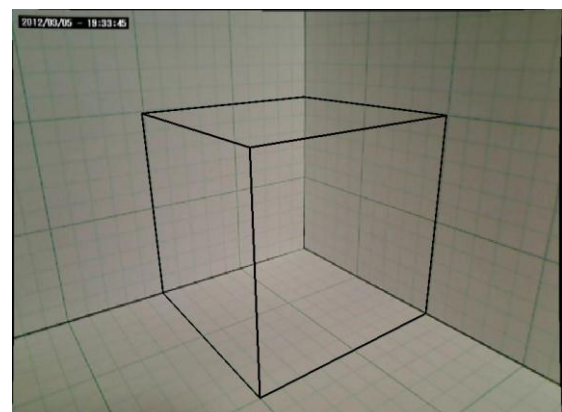


図2 立方体ワイヤーフレームの表示

図2に、底面と側面の壁を方眼紙で作成したカメラ画像上に、陰線処理した立方体のワイヤーフレームを表示した。なお、この際の画像サイズは800x600である。また、カメラの位置姿勢は、底面方眼紙の4点とOpenCVの関数を用いて算出した。

ワイヤーフレームの一边のサイズは、方眼紙上の10マスの長さと同じである。ワイヤーフレームの上面と側面方眼紙を比較すると、ワイヤーフレーム頂点が、方眼紙上の太線の交点に一致していることがわかる。これより、画像上の透視射影と、3次元モデルの透視射影がほぼ一致しており、カメラ画像上に、カメラパラメータを反映した3次元モデルを表示できていることがわかる。

3. CADデータの表示

製造業が使用している3次元CADの中間ファイルに、IGESフォーマット^[2]が多く利用されている。その理由の1つに、NURBS等を用いて自由曲面を表現することが可能であることが挙げられる。次に利用されている中間ファイルフォーマットにSTLデータがある。STLはサーフェスをポリゴンで構成することから、取り扱いが容易であるが、曲面を表現する場合はサーフェスをポリゴンで細分化（テサレーション）することにより、データ容量の増加してしまう問題がある。そこで、本報ではIGESフォーマットのCADデータを表示する。

方眼紙の背景画像上に、自由曲面形状を有するCADデータ(図3)を表示する。高さと底面の直径は、方眼紙上の10マスである。図3の背景画像は方眼紙であるが、実物モデルが配置されていれば、位置関係等を比較することができる。

画像上のモデルとCADモデルを比較する際、CADデータをワイヤーフレームで表示すると比較が容易となる。IGESフォーマットは直線や曲線データを有することから、エッジをワイヤーフレームで表示することは可能であるが、曲面の輪郭（稜線）に関するデータは有していない(図4)。そこで本報では、はじめに陰線処理したワイ

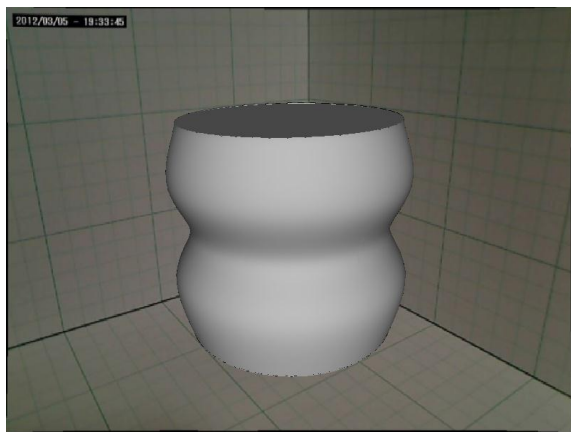


図3 自由曲面を有するモデルの表示

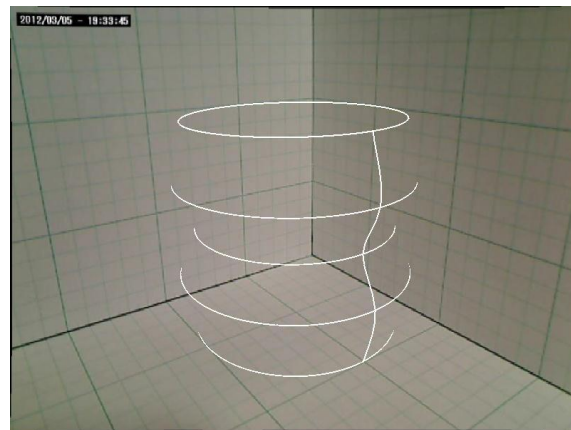


図4 自由曲面を有するモデルのワイヤーフレーム表示

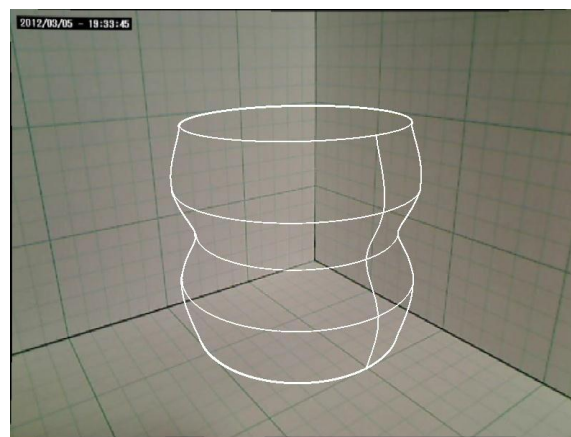


図5 輪郭形状を追加したワイヤーフレーム表示

ヤーフレームを描写し、Zバッファ値と微分フィルタを用いてモデルの輪郭形状を抽出する。その後、先に描写した表示の上に輪郭形状を上書きする(図5)。

4. まとめ

本報では、カメラ画像上に3次元CADデータを重畳表示した。OpenGLを用いることで、透視射影を考慮した3次元モデルの表示ができ、IGESデータを用いることで、自由曲面を有するCADモデルの表示ができた。

今回表示したモデルはシンプルな形状であった。今後は、複雑な形状を有するCADデータの表示が課題である。

文 献

- [1] 棚橋英樹, 山田俊郎, “写真とCGの自然な合成ツールの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 第6号, pp.15-16, 2005.
- [2] US product data association, “ANSI US PRO/100-1996”, 1996.

技術資料

VR技術を活用した電動車いす運転操作トレーニングシステム

藤井 勝敏 水野 渚 鳥井 勝彦* 遠藤 善道

Driving Simulator of the Electric Wheel Chair

Katsutoshi FUJII Nagisa MIZUNO Katsuhiko TORII* Yoshimichi ENDO

あらまし 仮想空間内で電動車いすの運転を疑似体験するシステムを開発した。本システムは、電動車いす用の操作レバーをノートPCに接続して使用するシンプルな構成で、特に低年齢の障がい児が初めて電動車いすを使用するに先立ち、操作装置の取り扱いに慣れるまでの間、自己トレーニングを行うために利用されることを想定し、VR技術を活用した目的達成型のタスク構成によって、楽しみながら反復して運転操作トレーニングが続けられるように配慮している。

キーワード 電動車いすシミュレータ、トレーニング、VR

1. はじめに

本研究所では、身体障がい者のQOL向上に寄与するために、IT/メカトロ技術を応用することにより、電動車いすに高度な機能を付与する研究を実施している。その一環として、様々な身体状況に対してより負担の少ない操作方法を実現するため、センサーや機構設計により新型の操作入力装置を研究開発している。

頸椎損傷等の重度障害を持つ被験者に評価を依頼する場合、当初から電動車いす実車上での試験は危険であるため、車いすの走行をシミュレーションするソフトウェアを開発し実験に利用してきた^[1]。このソフトウェアを当研究所のホームページで一般に公開したところ、研究目的以外に電動車いす初心者向けに操作装置の取り扱い訓練目的のニーズがあることがわかった。そこで、ソフトウェア利用者(トレーニング環境を提供する側)からの要望を踏まえた新しい電動車いす操作シミュレータを開発したので報告する。

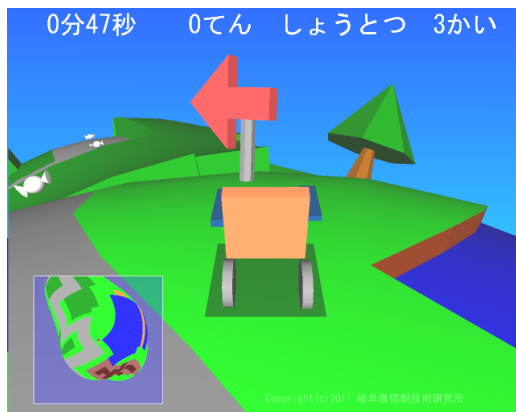


図1 電動車いす操作シミュレータ

2. 電動車いす操作シミュレータへの要望

従来の電動車いす運転シミュレータに対する主な要望事項を以下に列举する。

- ① 走路の拡大図のみでは目的地がわかりにくいので、全体図も同時に表示してほしい
- ② 初めて電動車いすを利用する子ども向けに、走路内にフルーツなどを置き、ゲーム感覚で楽しめる内容にしてほしい(効果音なども発声)
- ③ 壁に衝突したことが理解しやすいように効果音などで知らせてほしい
- ④ 通信ステータスなど機器開発用の表示は要らない
- ⑤ 走行画面は出来るだけ大きく、全画面表示に切り替えられるようにしてほしい
- ⑥ スタート地点からゴールまでのコース内容について、簡単なものから難易度の高いものまで5段階程度用意してほしい

これらの要望事項から、求められているシミュレータには、要望②⑥が象徴するように、特に低年齢の児童が楽しみながらトレーニングを続けられることに配慮したものが望まれていることがわかる。

そこで、改良に際しては画面の構成を図1のようにVR技術によるビデオゲーム的な表現技法を用い、仮想的な3次元空間のトレーニング場を構築し、臨場感のある映像提示とした。また、従来から使用している操作入力装置のほか、一般的なUSB接続型ジョイスティック装置の入力にも対応した。

3. 使用方法

画面中央に表示された電動車いすを操作入力装置(図2)で運転し、仮想トレーニング場(以下、マップ)内に設置

* 株式会社今仙技術研究所



図2 操作レバーの接続

したゴール地点に到着すると完了となる。ゴールの場所は、左下に表示されたミニマップ上でも確認できる。

運転中に壁面や障害物に衝突すると電動車いすが弾き返され、その回数がカウントされるとともに、画面上にその衝突回数と開始からの経過時間が表示されている。トレーニングの際は、これらを意識して安全かつ円滑に運転することが目標となる。このほか、入力装置の時系列データや走行軌跡も記録しており、手の可動域や運転傾向の解析に利用できる。

また、要望②に基づき、マップ上には複数の飴玉が配置しており、車いすで接近すると回収され得点が増える。飴玉はスタート地点からゴールまでの最短走路以外にも配置しており、収集目的で様々な場所へ移動することによって、訓練効果の向上を見込んでいる。

4. モニターテスト

本システムは、トレーニング環境を提供する側からの要望に沿って開発・改良を行ってきたが、トレーニングを受ける立場からの意見を得るために、岐阜県立関特別支援学校の生徒を対象に電動車いすシミュレータの体験会を開催した(図3)。最初に基本的な操作方法と走行目的の説明を行った後、交代で自由に試用させた。体験後にインタビューと体験中にもヒアリングを行った。ゲーム仕立てにしたことは大変好評で、楽しくトレーニングができたという肯定的な感想のほか、表1のような改善要望が集まった。



図3 体験会の様子

体験者の多くは現在手動または電動車いすを使用していたため、狭路や行き止まりでの切り返しによる回避動作など電動車いす特有の高度な運転技術を、特に説明を受けるまでもなく自分で習得していた。また、マップ内の見つけにくい飴玉を隣の体験者と情報交換しながら探したり、時間を競い合うなど、独自の遊び方を見つけ出し繰り返し利用する様子が見られた。

5. 今後の予定

本システムは当初の目的のとおり、今後、電動車いすを利用する児童向けトレーニングソフトとして活用する予定である。また従来版と同様、当研究所のホームページで一般公開することにより、広く要望を収集し、更なる改良を図っていきたいと考えている。

謝 辞

モニター協力いただきました岐阜県立関特別支援学校の生徒およびスタッフの皆様に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 千原ら, "障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第1報)", 岐阜県情報技術研究所研究報告 第11号, pp.15-20, 2010

表1 開発した電動車いすシミュレータに対する主な要望意見

ソフトウェア関係	衝突に対するペナルティ(5回ぶつかったらゲームオーバー等)があっても良い。操作成績によって合格・不合格を判断してくれるとよい。もっと速く走りたい。
ハードウェア関係	標準操作レバーが重い。自分が使っている電動車いすのレバーを使って練習したい。操作中にコントローラが動いてしまうため、机に固定できるとよい。
ステージ構成	一本道ステージは簡単すぎる。迷路ステージが面白い。もっと多くのステージで遊びたい(当日は10ステージを準備した)。レーシングサーキットのように、周回するコースがあるといい。
その他	筋力・可動域の低下に配慮し、より小さい動きに反応する操作装置を開発してほしい。電動車いすによる校内での接触事故は非常に多い。しかし、安全に練習できる環境を整えるのは難しいため、このようなシミュレータで練習効果が得られることを期待している。

岐阜県情報技術研究所研究報告 第 13 号 平成 23 年度

発行 平成 24 年 7 月 2 日

編集発行所 岐阜県情報技術研究所
岐阜県各務原市テクノプラザ 1-21

TEL: 058-379-3300

FAX: 058-379-3301

<http://www.gifu-irtc.go.jp>
