

2005 年度  
修士論文

**速度・加速度ベクトルの可視化とその応用**

Velocity and Acceleration Vectors Visualization and Their Applications

法政大学大学院

工学研究科 電気工学専攻

学籍番号 04R3249

やました たつや  
山下 達也

指導教授 齋藤兆古

# 目次

ABSTRACT.....	ii
1. 緒 論.....	1
2. 電磁誘導型磁気センサによる速度測定.....	2
2.1 原理.....	2
2.2 自由落下速度測定による検証.....	2
2.3 回転体の測定.....	3
2.3.1 概要.....	3
2.3.2 自転車車輪の測定.....	3
3. CCD 動画像による速度測定.....	7
3.1 原理.....	7
3.2 差分画像の利用.....	7
3.3 斜面を滑落する対象の測定.....	7
3.4 CCD カメラの並列化.....	10
3.4.1 概要.....	10
3.4.2 パラシュートの動きの測定.....	10
3.4.3 水中を落下する物体の速度測定.....	11
3.5 三次元運動の可視化.....	13
3.5.1 概要.....	13
3.5.2 2方向からの撮影による可視化.....	13
4. 磁気センサと CCD 画像法ハイブリッド測定法.....	16
4.1 原理.....	16
4.2 磁気ダンパの性能評価.....	16
5. 結論.....	17
参 考 文 献.....	18
研究実績.....	19
謝辞.....	20

## ABSTRACT

In recent years, it is more important to get to know the speed and acceleration vectors without directly touching a target.

High sensibility, toughness to the mechanical and environmental conditions such as stress, temperature and humidity are required to any types of measurement instruments. In the present paper, we propose two types of speed and acceleration vectors measurement methodologies.

One is using the sensing or picking up coil type magnetic sensor, which has reasonable tough properties to the mechanical and environmental conditions, but has weak points, i.e., it does not have high sensibility at low speed, and limited to the particular targets. The other employs charge coupled devices, i.e., CCD camera, which has a clear advantage applicable to low speed target, and also not limited to the particular targets. Even though, CCD camera method can be applicable to the low speed targets but can not be applicable to the high speed targets because of limited capture time. Also, its accuracy is low compared with those of magnetic sensor method.

Thus, this paper proposes a hybrid scheme combining the magnetic sensor with CCD image measurement methods. Initial experiments demonstrate the usefulness and weakness of the tested sensors.

## 1. 緒 論

近年、道路交通におけるITS、工場における搬送システムなどの分野で輸送・搬送の自動化、制御の高度化が進んでおり、それに伴い移動体の位置、速度、加速度を計測し、その状態を可視的に把握することの重要性はより大きなものとなっている。近距離においてこれを実現する方途としては、赤外線センサ、レーダー波などが開発・実用化されているが、これらの技術は瞬間速度を計測する場合は高い精度を有するが、加減速傾向といった時間的变化を捉えるには不適當である。

以上のような社会的状況を鑑み、筆者らはこれまでピックアップコイルを用いた電磁誘導型磁気センサによる速度・加速度計測システムを提案し、それらの妥当性を実験的に検証してきた。電磁誘導型の磁気センサは機械的構造が単純で、物理的に破壊される以外に故障が考えられないほど信頼性が高く、雨・風・雪などの気象・環境変化に強い。また、複数のセンサを用いることで加速度等の時間变化を捉えることも可能であり、精度も高いという特性を有する。一方で、誘導起電力を検知する動作原理に基づくため、磁界発生源を有する必要があり測定対象が限定されること、低速域においては精度が劣ることといった課題も有している。

これらの欠点を補完する方途として、CCD(=Charge Coupled Device(電荷結合素子))カメラ動画像による速度・加速度測定を考える。高密度化に限界のあるコイル間距離に依存する電磁誘導型磁気センサに対し、動画像による速度計測はフレーム間隔に依存するため、一般に普及している1フレーム/30sのデジタルビデオカメラであっても十分に高い密度の計測を行うことが可能であり速度変化に対応しやすい。一方、高速で移動する物体に対してはCCDの応答速度限界に起因した残像を生じさせるため十分な精度を得ることが難しい。

これらのことを踏まえ、本論文では高速域で有利な磁気センサと低速域で有利なCCD画像による測定法を組み合わせた速度・加速度測定装置を提案し、物体の速度を制御する磁気ダンパの性能評価に上記測定システムを適用することで、その妥当性を検証する。

本論文の構成は以下の通りである。第1章は緒論である。第2章では磁気センサによる速度・加速度測定法を提案し、一例として自由落下する測定対象物の速度測定実験について述べる。第3章ではCCD動画像解析による速度・加速度測定法を提案し、一例として斜面を滑走する対象物の速度測定実験について述べる。第4章ではこれらの測定法を組み合わせることによる複合的測定法を提案し、実用例として磁気ダンパの性能評価実験について述べる。第5章はまとめである。

## 2. 電磁誘導型磁気センサによる速度測定

### 2.1 原理

筆者はこれまで磁気センサによる速度・加速度測定の研究を進めてきた．その原理は以下のとおりである．測定対象物がピックアップコイル近傍またはその内部を通過する際，Faraday の法則より式(1)で表せる電圧が磁界変化を妨げる方向へ発生する．

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} [V] \quad (1)$$

この電圧をピックアップコイルにより起電力として捉えることで，測定対象物の通過を検知する．1個のセンサで得られる情報量は電圧値のみであるが，測定対象物の移動方向に沿って複数個のセンサが配置可能であれば，次に述べる例に示すように速度・加速度等の情報収集に対して有効な方途となる．このセンサは磁界発生源を必要とするが，ピックアップコイル自身が磁界発生源を持たない場合，測定対象物の磁界を検出する．従って，測定対象物は必然的に永久磁石または電磁石となる[1]．

### 2.2 自由落下速度測定による検証

電磁誘導型磁気センサの利点として高い精度が挙げられるが，その実証例として，自由落下する測定対象物の速度測定の結果を示す．図1のように複数のピックアップコイルをアクリルパイプに一定間隔で巻いた実験装置を構成する．実験は任意の高さから永久磁石を落下させ，測定対象物の通過をセンサ出力電圧で検知し，その波形から各ピックアップコイル通過時刻の差を求め，速度の算出に用いる．投下位置からの距離を $h$ として，各コイルによる測定波形を共通の時間軸上に合成した結果を図2に示す．

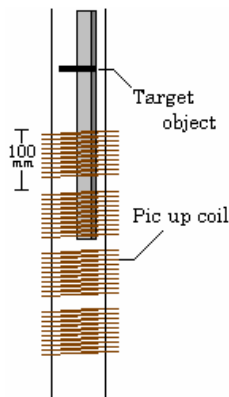


図1 実験装置

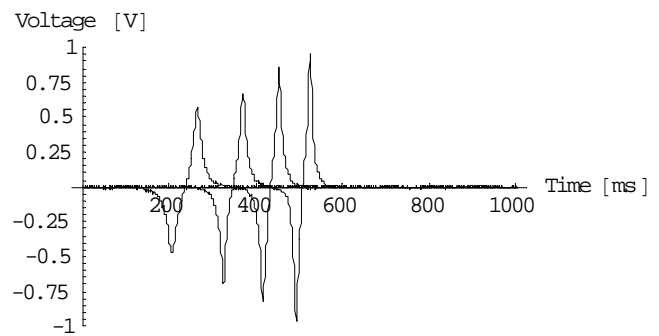


図2 測定波形

図2に見られる通り，各波形の応答速度は測定対象物の移動速度に対し十分に速く，各波形のピークを用いることで通過時刻の差を取ることは容易である．これを基にしたコイル間平均速度の算出結果及びその理論値を図3に示す．この結果からも比較的高精度で速度測定が可能であることが判る．また，3点以上測定することで，加速度の算出も同様に可能となる[2]．

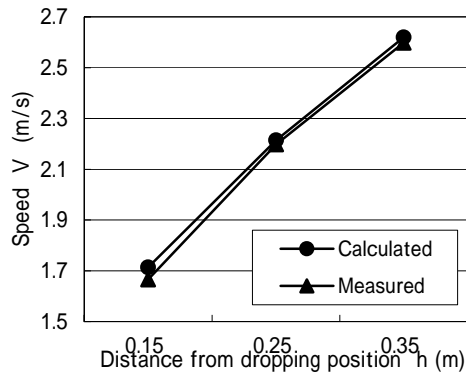


図3 速度に関する実験値と算出値の比較

## 2.3 回転体の測定

### 2.3.1 概要

前項では直線的な動きの測定について述べ、誘導電圧が測定可能な条件下であればこの手法は回転運動の測定に対しても有効である。回転体では、固定されたセンサにより得られた電圧波形のピーク間距離は回転数に比例する。これを利用することで回転速度等の算出が可能である。

### 2.3.2 自転車車輪の測定

回転体の測定の具体例として、自転車車輪の回転について測定し、速度・加速度・積算走行距離を算出に用いる手法を紹介する。自転車車輪に適用する場合、高速で回転する車輪にセンサを取り付けることは困難であるため、一般的に固定されているフレーム側に取り付ける。本測定法では磁界発生源およびセンサ部と測定対象が相対運動していることが必要となる。

#### 2.3.2.1 永久磁石を利用した測定

本項では外部から電力供給する必要のない永久磁石を用いた場合について述べる。図4に示す実験装置を用いて測定した。測定対象物が磁界発生源となることからセンサはピックアップコイルのみで良いこととなり、測定が簡便に行える利点がある。また本実験のように測定対象が単数である場合、一定時間における測定電圧波形のピーク数は車輪の回転数と等しくなる。

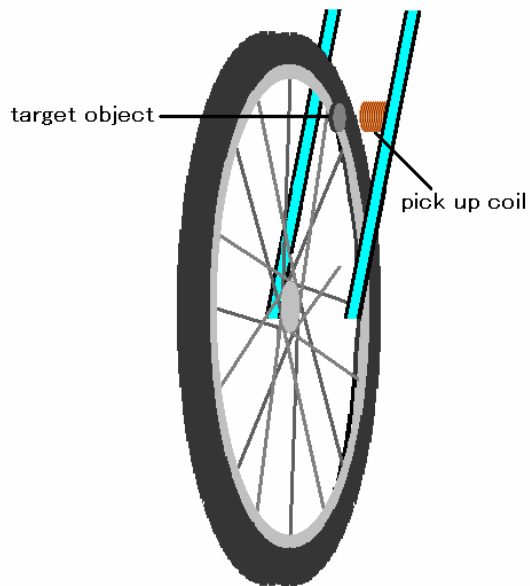
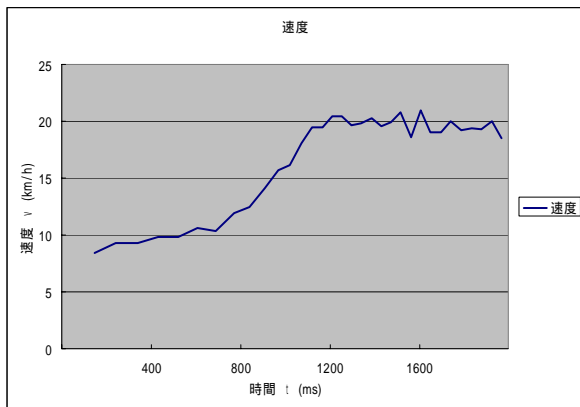
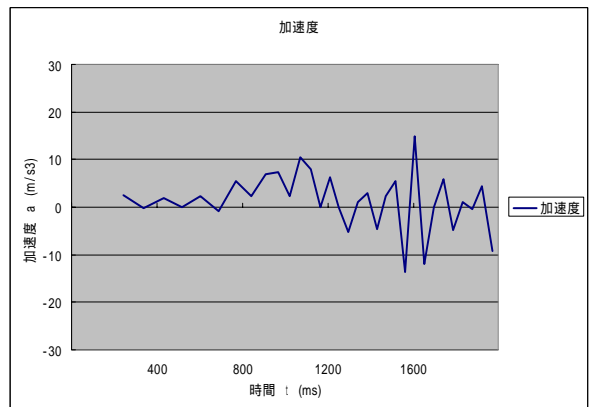


図4 永久磁石を利用した回転体の測定実験装置

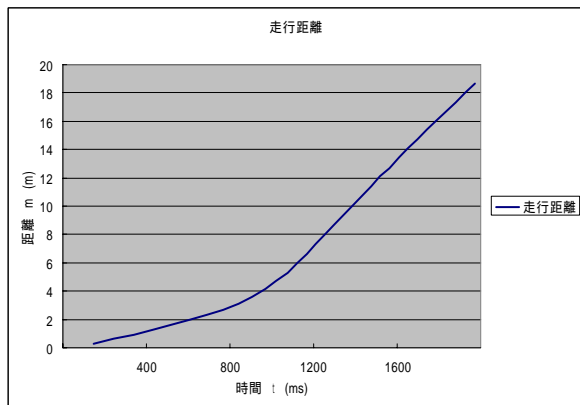
算出された速度・加速度・積算走行距離を図5に示す．本実験では加速から惰行に変化する過程を測定したが，各グラフから速度変化をセンサは詳細に捉えていることが分かる．しかしながら，今回の測定では車輪に取り付けた永久磁石は1箇所のみであったため、車輪が1回転する間の詳細な速度変化は捉えることができず、より低速度の測定においては実際の速度との誤差が大きくなる．より詳細な測定には複数の永久磁石を等角度で配置することで可能となる．



速度



加速度



積算距離

図5 永久磁石を利用した回転体の測定結果

### 2.3.2.2 車輪スポークを利用した測定

前述の通り、磁界発生源が測定対象側である場合の精度の確保には、対象の永久磁石を増やすことが必要である。一方、磁界発生源がセンサ側にある場合、測定対象を車輪自体のスポークとすることで、より簡便に詳細な測定が可能である。スポークは通常20本以上あることから1回転あたりの測定回数が大幅に増加し検出精度を高めることが出来る。また、新たに測定対象を配置する必要がないことも有利な点である。

図6に示す実験装置を用いて、車輪スポークを測定対象とした測定を行った。

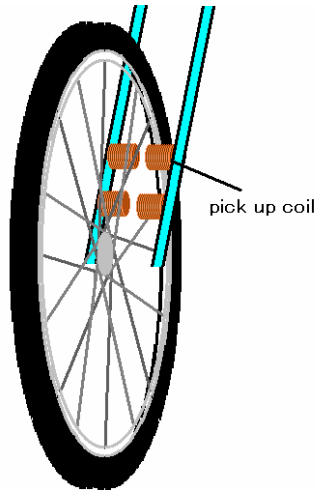


図6 スポークを利用した回転体の測定実験装置

算出された速度・加速度・積算走行距離を図7に示す。今回の測定では加減速のない惰行状態で測定しているが、僅かながら自然に減速している様子が詳細に捉えられている。

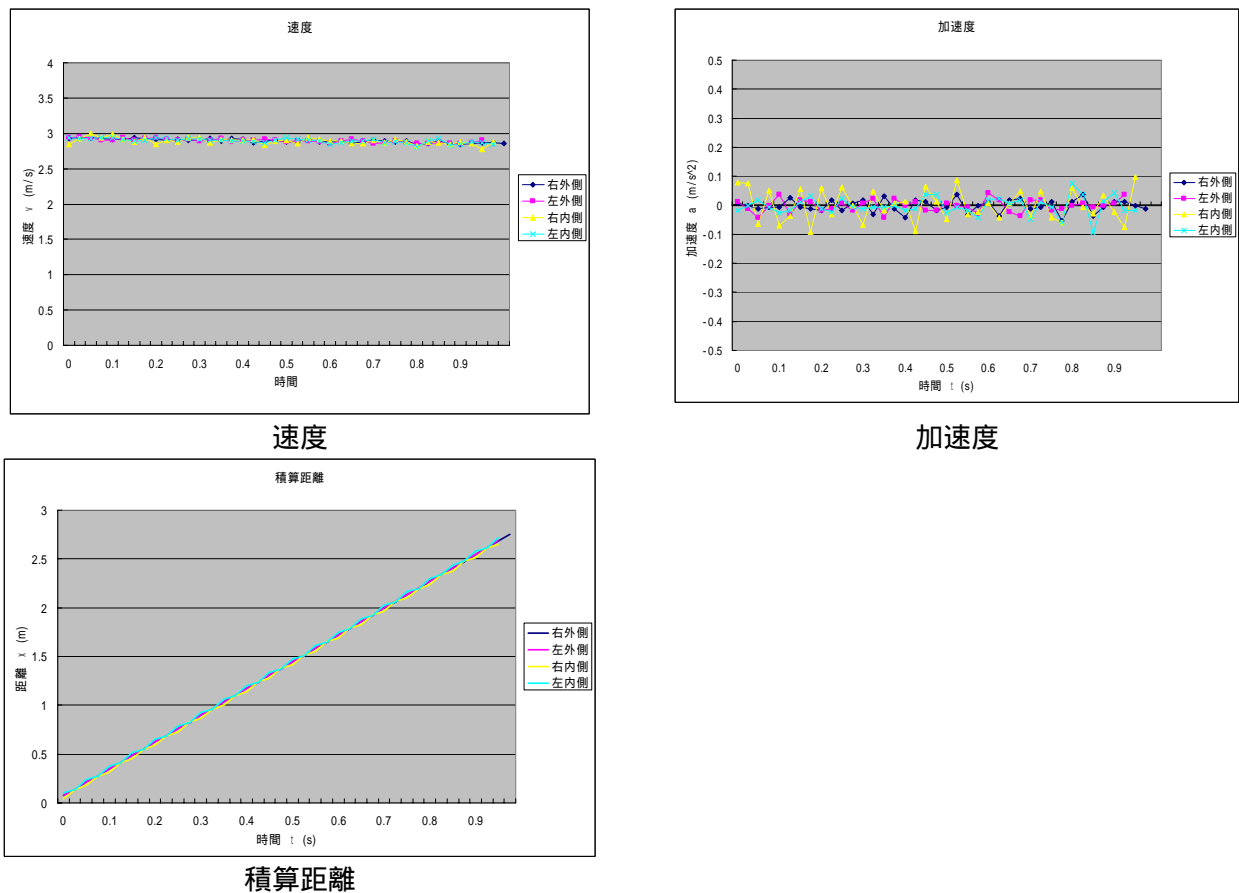
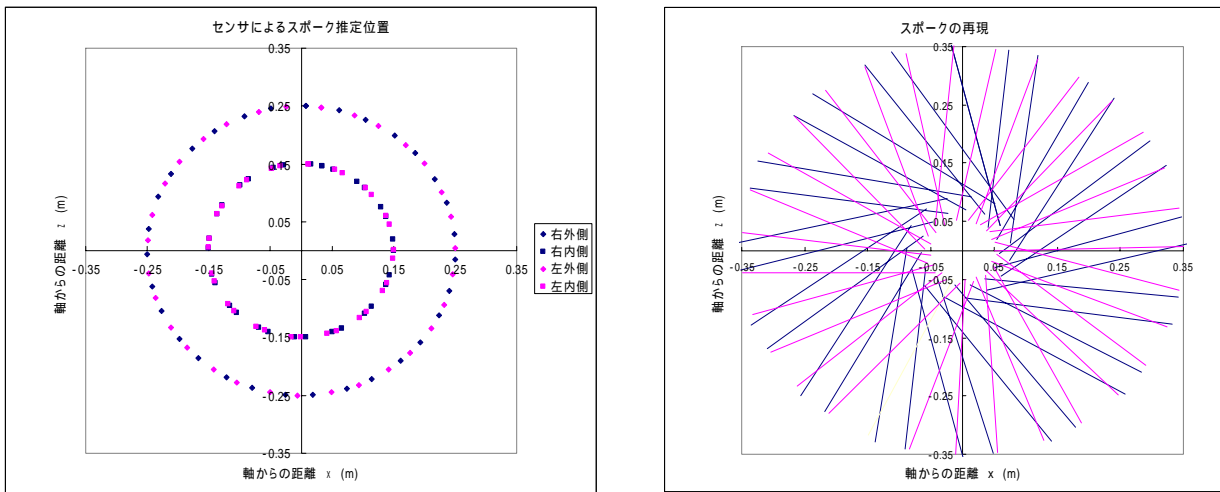


図7 スポークを利用した回転体の測定結果



この測定では図6に示すとおり，車輪を挟むように4コイルを配置して測定を行った．各コイルにおけるスポーク検知のタイミング差と測定対象間との距離によって異なる電圧値となるから，図8(a)に示すように車輪左右におけるスポークの検出位置を求めることが出来，図8(b)に示すようにスポークの配置を再現することが可能となる．



(a) スポーク検出位置

(b) スポークの再現

図8 センサによるスポーク位置の再現

### 3. CCD 動画像による速度測定

#### 3.1 原理

急な速度変化や低速時といった磁気センサによる速度測定が不利な条件下で速度測定を可能とする方法としてCCD動画像法を採用する。測定原理は以下の通りである。

CCDを用いたデジタルビデオカメラによって撮影された動画像をフレームの集合と捉え、各フレームにおける測定対象の位置を検出する。フレーム間の時間差は一定値で与えられることから、既知の長さの基準物を同時に写し込むことにより、各フレーム間の測定対象物の位置・移動距離から速度を容易に算出することが可能となる。

#### 3.2 差分画像の利用

CCD画像測定法は一方で、測定対象物の速度が上がるとCCDの過渡現象が追従できないため残像が残る、位置・移動距離の特定が困難となる。このため何らかの信号処理が必要となる。その方途として各フレーム間の差分画像の利用を提案する。

原理は以下のとおりである。φ<sub>1</sub>、φ<sub>2</sub>を連続するフレーム画像とすると一階差分は

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\Delta t} \quad (2)$$

で求まる。一階差分では、動画像を構成する全フレーム数より1枚少ない差分画像が得られる。これにより変化のない背景画像は数値データでゼロに相当する黒となって現れ、異なる背景画像を持った動画像でも、時間的に変化した対象物の画像のみが得られる[3]。

#### 3.3 斜面を滑落する対象の測定

具体例として、斜面を滑落する物体の速度測定を行う。これは図9に示す実験装置を構築し、滑落させた測定対象物の速度検知を試みるものである。

撮影した動画像のフレーム画像を図10に、得られた差分画像を図11に示す。図10、11の画像から算出した速度を磁気センサによる速度と合わせて図12に示す。

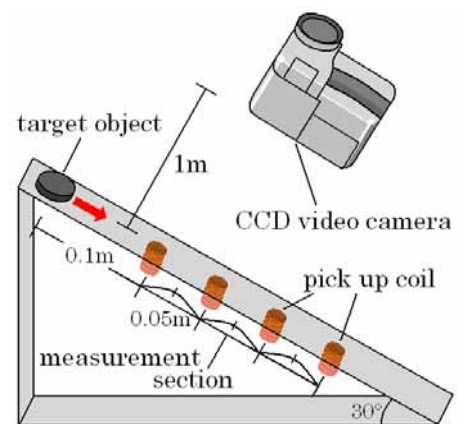


図9 斜面滑走

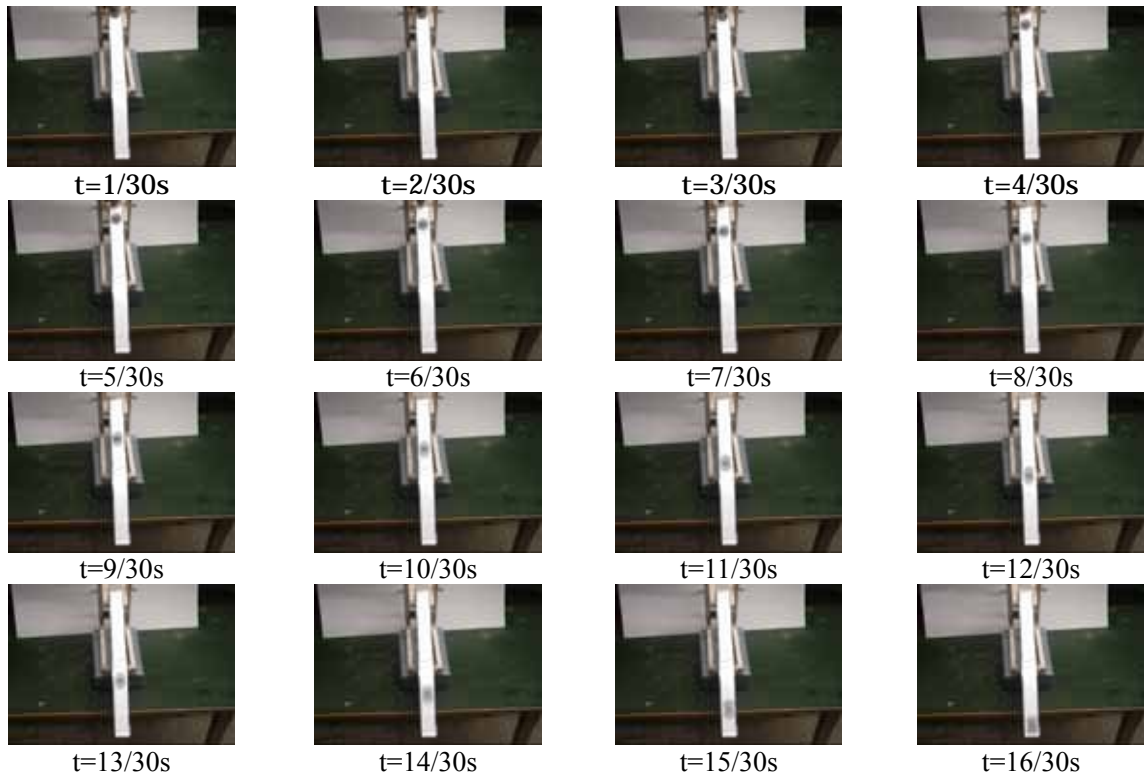


図 1 0 撮影画像

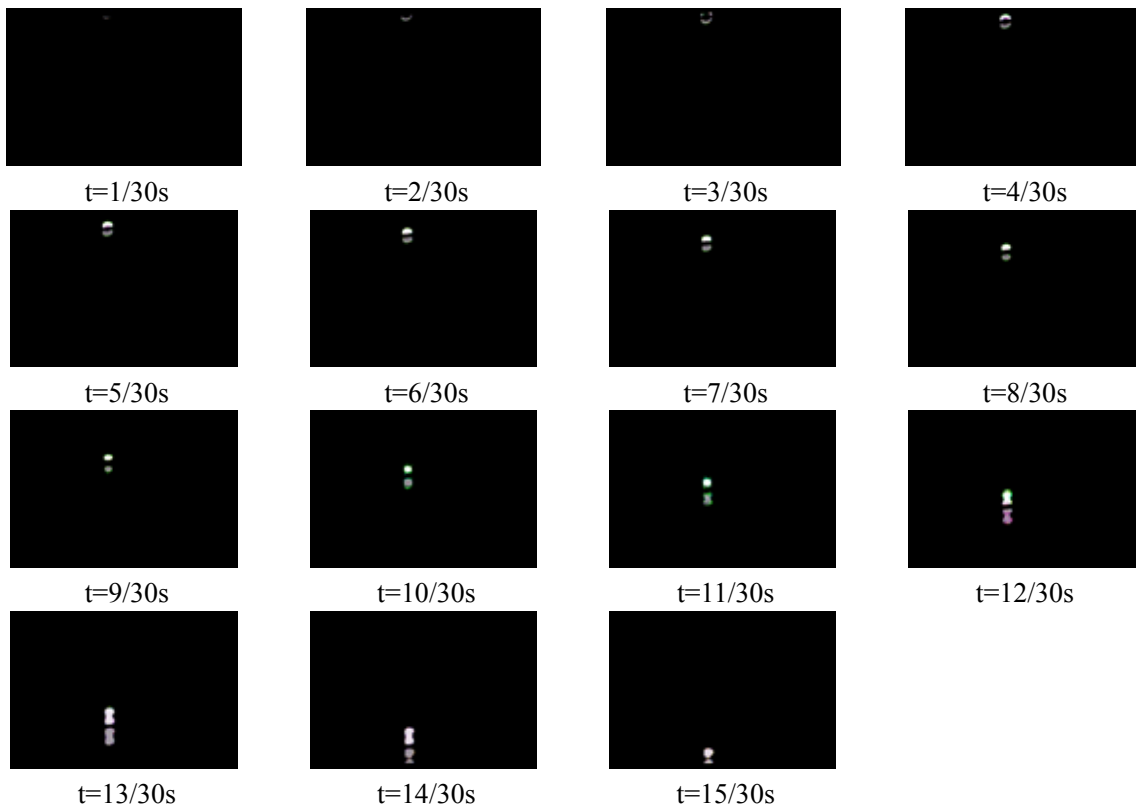


図 1 1 差分画像

図 1 2 に示すとおり，算出結果は磁気センサによる測定結果と比較的近い値であり，急激な速度変化の少ない条件化では両測定法の差は小さい．また，前述のとおり磁気センサによる測定結果は高精度であることから，CCD法は比較的高い精度を確保しているともいえる[4]．

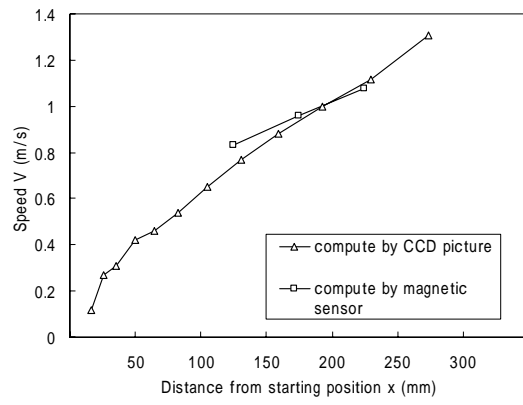


图 1 2 速度算出值

### 3.4 CCD カメラの並列化

#### 3.4.1 概要

本手法における一課題として1秒間のフレーム数(=フレームレート)の限界が挙げられる。普及型デジタルカメラのフレームレートは30fps程度であり、高速で水平移動するターゲットに対する位置検出を行う場合等には正確な測定が困難となる。

この問題点を克服する方途として、複数のCCDデジタルビデオカメラによる並列撮影を考える。

#### 3.4.2 パラシュートの動きの測定

具体例として落下するパラシュートの移動速度測定実験を行った。撮影はPC接続のCCDデジタルビデオカメラを用い、70[mm]離して並列に2カメラを配置した図13の実験装置を構築して行った。

得られた結果を図14に示す。CCDカメラの位置の差を補正していないため水平方向の位置に差が生じているが、速度は水平・鉛直ともほぼ同じ傾向であり、移動距離も近い値であることが分かる。

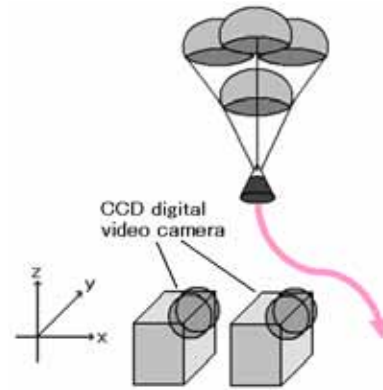


図13 実験装置

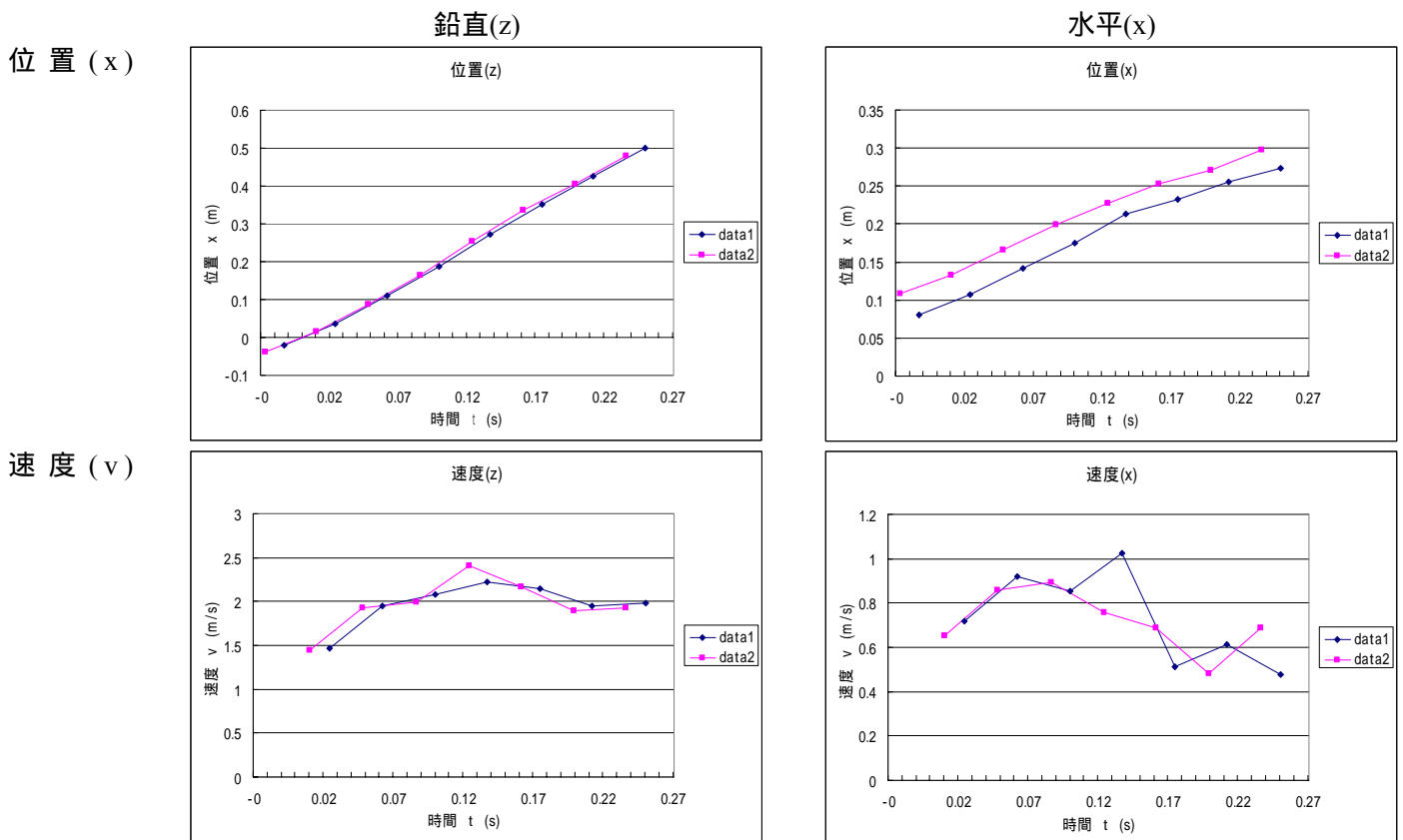


図14 移動速度測定実験結果

### 3.4.3 水中を落下する物体の速度測定

#### 3.4.3.1 概要

CCD カメラの並列撮影画像による移動速度測定実験に関する 2 番目の具体例として,水槽に満たされた水中を落下する物体を撮影し,その動きの測定について述べる.

図 1 5 の実験装置を構築し,前項の実験同様PC接続の CCDカメラを用い,2カメラを120[mm]離して並列に配置し撮影した.基準となる高さの通過時刻を基に異なるフレームレートによる算出結果を1/30秒ごとの位置・速度に換算した.

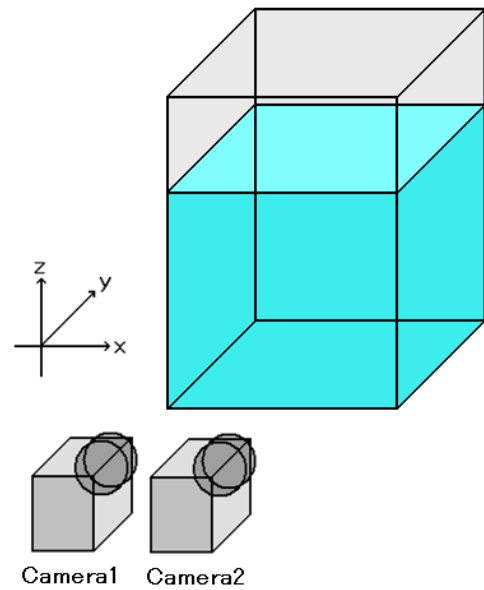


図 1 5 実験装置

#### 3.4.3.2 算出結果

鉛直・水平両方向における位置・速度の算出結果を図 1 6 に示す.両カメラ間の位置の差を補正していないため,水平方向でのカメラの位置による差が大きく現れているが,速度では定数値であるカメラの位置ずれの影響は削除され,ほぼ同一の値となる.鉛直方向においても細かい速度変化が捉えられており,両カメラの算出速度を比較することでより高精度の測定が期待できる.

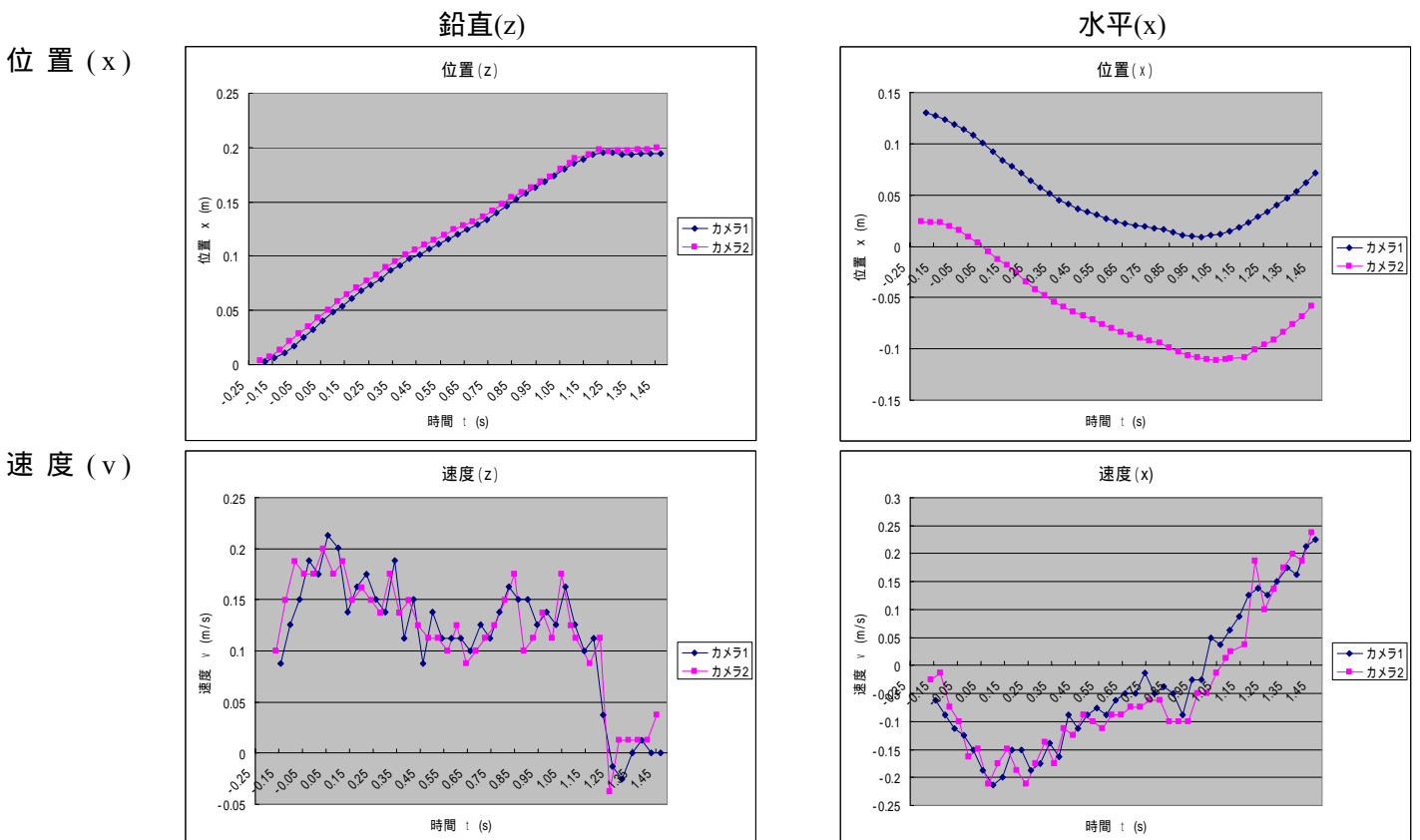


図 1 6 水中を落下する物体の動き測定結果

### 3.4.3.3 Y 軸方向の位置推定

図 1 5 のように X・Y・Z 座標を定めた場合、本測定で撮影された画像からは X・Z 方向の測定対象位置を得ることが可能であるが、三角測量の原理を用いることで Y 軸方向の測定対象位置を推定することが可能である。これは人間の視覚機能におけるステレオ視のように、離れたカメラの視点の位置が異なることから角度差を求め、距離を算出するものである。図 1 7 に示す実験装置を構築し測定した。

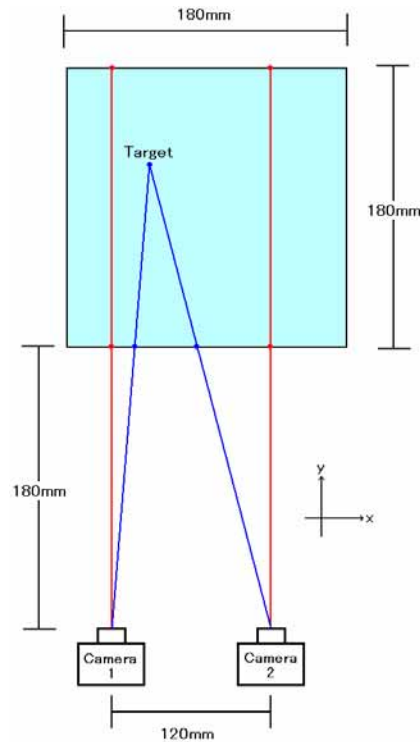


図 1 7 三角測量概念図

算出した Y 軸方向における測定対象の推定位置を図 1 8 に、そこから得られる X-Y 平面における推定位置を図 1 9 に示す。これらの結果から、対象は円を描くように移動している様子が分かる。

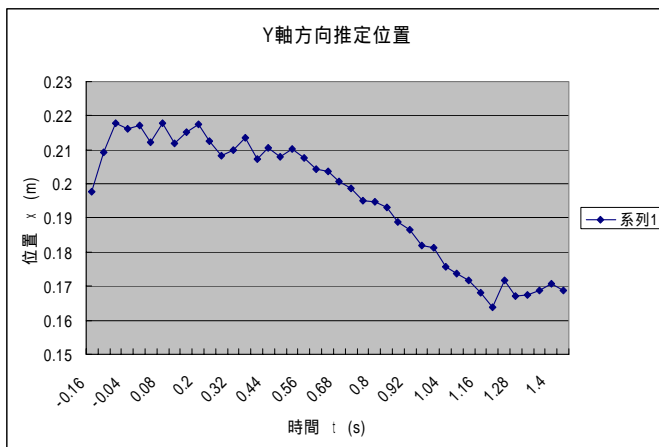


図 1 8 Y 軸方向推定位置

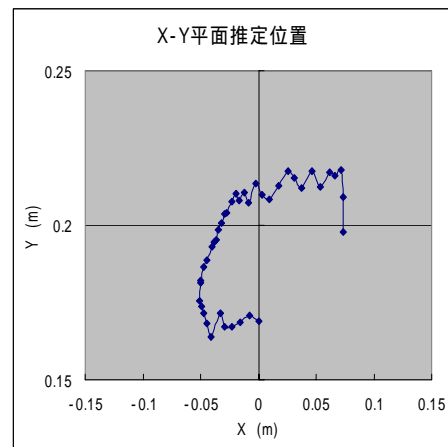


図 1 9 X-Y 平面推定位置

### 3.5 三次元運動の可視化

#### 3.5.1 概要

単一のカメラにおいて得られる画像による測定対象物の位置情報は2次元であるが、直交する方向から複数のカメラで撮影することで3次元の位置情報を得ることが可能である。

#### 3.5.2 2方向からの撮影による可視化

具体例として2次元方向の速度測定実験と同様にパラシュートを用い、図20に示すように、2個のデジタルカメラを用いて平面で直交するX・Y方向からの同時撮影を行った。基準となる高さの通過時刻を測定し、異なるフレームレートによる算出結果を1/30秒ごとの位置・速度に換算する。また、一定の高さの通過時刻を測定し基準時刻として採用した。

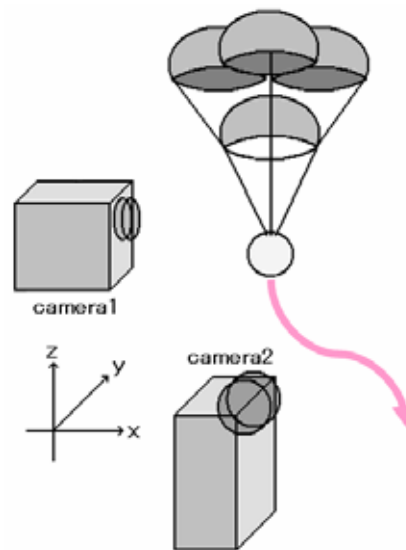
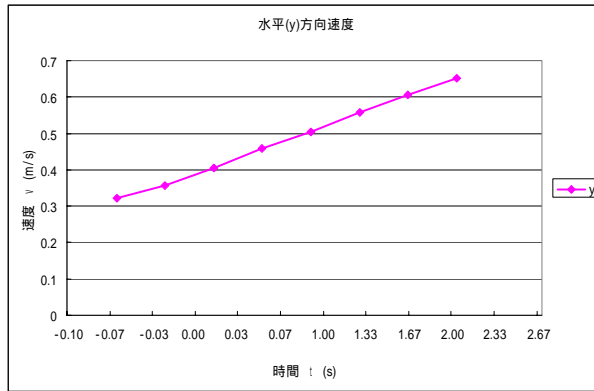


図20 実験装置

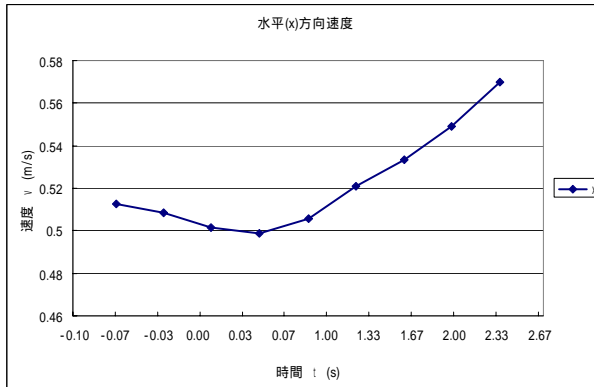


水平の X・Y 軸方向，鉛直の Z 軸方向の各位置測定結果を図 2 1 に示す。

水平(x)



水平(y)



鉛直(z)

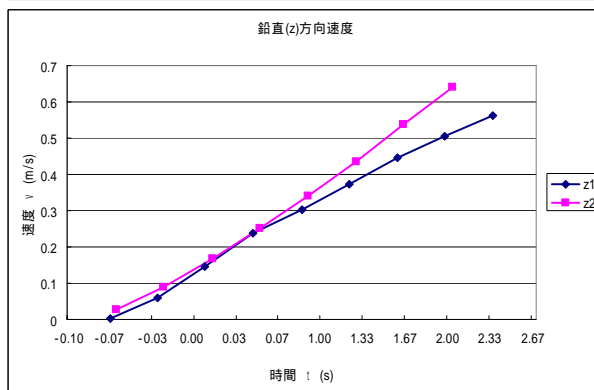


図 2 1 2 方向からの撮影によるパラシュート位置測定結果

3方向からの測定結果を用いて対象の3次元的位置変化を図2.2に示す。立体的な測定対象物の運動を可視的に判断することが可能であることが分かる。

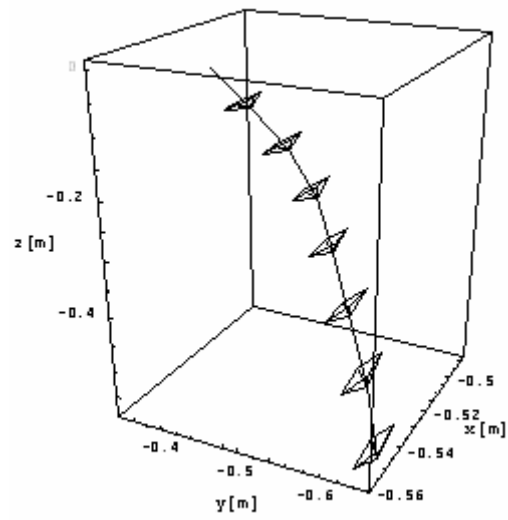


図2.2 3次元運動の可視化結果

## 4. 磁気センサと CCD 画像法ハイブリッド測定法

### 4.1 原理

ここまで2種の測定法を提案したが、磁気センサは急激な速度変化に対してセンサ数の問題から測定精度が低下する。他方、CCD画像法はフレームレートの限界から高速度域の測定精度が低い。これを改善するため、両測定法を同時に併用し、互いの特性を補完することを試みる。

### 4.2 磁気ダンパの性能評価

具体例として斜面搬送装置における磁気ダンパの性能評価実験を行う。磁気ダンパは、斜面を滑落して搬送する際、磁石の吸反発力と動磁界が喚起する渦電流による吸反発を利用することで、対象物の速度を制御するものである。搬送物の速度を所定の速度に制御できるかどうかで性能を評価できることから、前述の二種の速度・加速度測定法を適用し、測定対象物の挙動を可視化することで磁気ダンパによる加減速特性の把握を試みる。

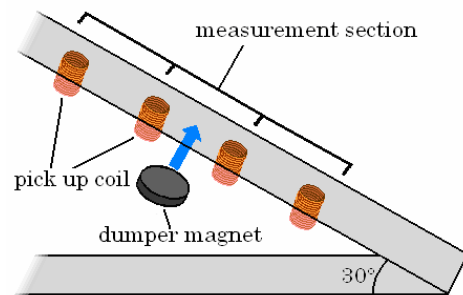


図 2 3 磁気ダンパ性能評価のための実験装置

実験は、図 9 の実験装置にダンパとして永久磁石を採用し、図 2 3 に示す実験装置を構築した。測定は速度変化の再現に優れた CCD 画像によって速度を算出し、より精度の高い磁気センサの測定結果から求められた平均速度を用いて補正する。結果を図 2 4 に示す。また、速度変化傾向を把握することが容易な加速度についても算出し、図 2 5 に示す。

以上の結果から対象物を減速させるというダンパ本来の働きだけでなく、直前の加速も含めた対象物に対するダンパの影響が明らかとなった[4]。

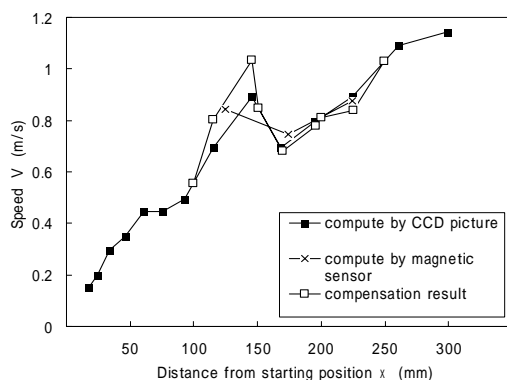


図 2 4 速度算出値

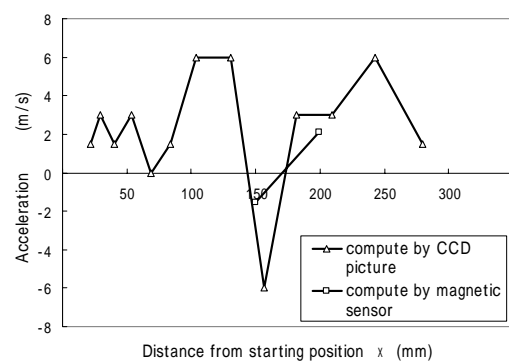


図 2 5 加速度算出値

## 5. 結論

本論文では電磁誘導型磁気センサとCCD動画像の2種類の速度・加速度測定法を組み合わせたハイブリッド型速度・加速度測定法に関する実験的検討を行った。

第一に提案した電磁誘導型磁気センサによる測定法は非接触で測定可能であるだけでなく高精度でもあり、磁界発生源を適切に配置することによって直線運動だけでなく回転運動に対しても良好な結果を得ることが出来ることが明らかになった。

次に提案したCCD動画像による測定法は高いフレームレートによってより詳細な速度変化を捉えることが出来、さらに複数のカメラによる同時撮影を行うことで3次元の運動の可視化や並列化による精度の向上が可能であることが明らかになった。

電磁誘導型磁気センサの測定範囲が磁界を検知可能な測定対象近傍に限られ、誘導起電圧を得るためにセンサと対象間の相対速度が高いことが望ましい。また、CCDカメラによる撮影では、CCDの過渡現象が測定対象物の移動速度に追従できないことやカメラによる画像処理を原因として起こる残像が残る恐れがあり、より画像上の変位量が少なく追従しやすい遠距離で相対速度が小さい測定に適している。

両測定それぞれに適した測定範囲や速度が異なることから、併用して測定するハイブリッド型速度・加速度測定法を提案し、互いの特性が補完され精度の向上が可能であることが明らかになった。

本論文で提案した測定法は、環境の変化にも強く、各種の非接触測定において有用であると考えられる。

## 参考文献

- [1]茂田幸康,早野誠治,齋藤兆古: ウェーブレット変換による信号処理の一方法, 可視化情報, Vol. 20, No. 1 (2000) pp. 273-276.
- [2]山下達也,早野誠治,齋藤兆古,堀井清之: 磁気センサ信号の可視化とその応用,可視化情報, Vol. 24, No. 1 (2004) pp.243-246.
- [3]小杉山格,早野誠治,齋藤兆古,堀井清之: 有限差分を用いた動画像認識,可視化情報, Vol. 24, No. 1 (2004) pp.247-250.
- [4]山下達也,早野誠治,齋藤兆古,堀井清之: 速度・加速度ベクトルの可視化とその応用,可視化情報, Vol. 25, No. 1 (2005) pp.71-74.

## 研究実績

- [1]2004年7月 可視化情報学会 第32回 可視化情報シンポジウム  
山下達也,早野誠治,斎藤兆古,堀井清之:「磁気センサ信号の可視化とその応用」
- [2]2005年7月 可視化情報学会 第33回 可視化情報シンポジウム  
山下達也,早野誠治,斎藤兆古,堀井清之:「速度・加速度ベクトルの可視化とその応用」

## 謝辞

本研究の進行と論文執筆にあたって多大なご助言とご指導を賜りました齋藤兆古先生、早野誠治先生、ならびに公私に亘るご支援ご協力を頂きました齋藤兆古研究室、早野誠治研究室の皆様、この場を借りて心よりお礼申し上げます。