



## Parte A: Attività sperimentali sul dispositivo PEWEC in scala 1:12

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi, E. Giovannini,  
A. Fontanella, G. Sannino

## PARTE A: ATTIVITÀ SPERIMENTALI SUL DISPOSITIVO PEWEC IN SCALA 1:12

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi (Politecnico di Torino)  
E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: Sviluppo di un sistema oscillante passivo per il recupero di energia dal moto ondoso

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Progettazione e sperimentazione in vasca di un modello in scala 1:12 di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Prof. Giuliana Mattiazzo

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1.1 <i>Layout del sistema</i> .....	5
2.1.2 <i>Lo scafo</i> .....	6
2.1.3 <i>L'assetto del generatore</i> .....	6
2.2 SVOLGIMENTO DELLE PROVE.....	9
2.2.1 <i>Il setup sperimentale</i> .....	10
2.2.2 <i>Il sistema di ormeggio</i> .....	12
2.2.3 <i>Misura del profilo dell'onda</i> .....	15
2.2.4 <i>Misura dell'angolo <math>\delta</math> di beccheggio dello scafo</i> .....	18
2.2.5 <i>Misura di angolo, velocità e coppia agenti sul PTO</i> .....	19
2.2.6 <i>Il sistema di controllo del PTO</i> .....	22
2.2.7 <i>Metodologia di esecuzione delle prove</i> .....	25
2.3 RISULTATI DELLE PROVE .....	26
2.3.1 <i>Prove per l'identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato</i> .....	26
2.3.2 <i>Prove di risposta in frequenza con coefficiente di smorzamento pari a 0.5 Nms/rad e rigidità nulla</i> .....	27
2.3.3 <i>Prove con onda a periodo <math>T = 1.3</math> s, <math>c = 0.5</math> Nms/rad e rigidità variabile</i> .....	30
3 CONCLUSIONI.....	32
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	33

## Sommario

Le attività svolte nell'ambito dell'accordo di Collaborazione tra ENEA e Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, hanno riguardato la progettazione, realizzazione e sperimentazione di un sistema di conversione dell'energia da moto ondoso a massa oscillante.

Nel presente lavoro si mostra l'attività di sperimentazione sul prototipo del sistema di conversione di energia da moto ondoso a massa oscillante. In tale sistema le onde provocano l'oscillazione dello scafo che la trasmette al pendolo contenuto internamente. Il moto relativo scafo-pendolo attiva un generatore che produce energia elettrica.

Il prototipo in scala realizzato in collaborazione con ENEA è stato provato sperimentalmente presso il canale di prova del Politecnico di Torino nell'anno 2014 per diverse condizioni di moto ondoso e parametri di controllo del sistema.

I risultati della campagna di test sono stati confrontati con un modello numerico del sistema che è stato sviluppato all'interno dell'accordo di Collaborazione. Il modello numerico simula la dinamica del sistema e la potenza prodotta dal convertitore a partire dall'onda incidente.

Tale modello abbinato a una procedura di sintonizzazione ha prodotto una buona concordanza con i dati sperimentali.

In questo report si mostra l'evoluzione del setup di prova e delle prestazioni del prototipo, passando dall'utilizzo del canale al Politecnico di Torino al bacino n° 2 dell'INSEAN che grazie alle maggiori dimensioni permette di testare il prototipo senza l'influenza degli effetti di bordo. Il prototipo inoltre è stato migliorato in modo da essere completamente WiFi ed evitare i possibili errori di misura derivanti dalle rigidità dei cavi di collegamento degli apparati di bordo a quelli di terra.

Nella nuova campagna di prova vengono inoltre svolte una nuova tipologia di prova al variare della rigidità del PTO.

## 1 Introduzione

Oggetto dell'Accordo di Collaborazione è la progettazione, realizzazione e sperimentazione in scala di un sistema di produzione di energia da moto ondoso a massa oscillante.

Il prototipo è stato progettato in collaborazione ENEA – Politecnico di Torino ed è stato provato nell'anno 2014 presso il canale di prova del Politecnico di Torino.

In questa campagna di test i seguenti miglioramenti al setup sperimentale sono stati svolti:

1. Utilizzo del bacino n° 2 dell'Istituto INSEAN di Roma che ha dimensioni maggiori in modo da ridurre gli effetti di bordo che potessero verificarsi presso il canale del Politecnico di Torino
2. Implementazione di un sistema di controllo ed acquisizione completamente contenuto nel sistema galleggiante in modo da evitare le azioni di rigidità non trascurabile dei cavi di collegamento dei sistemi di bordo a quelli di terra precedentemente presenti nell'esperimento 2014.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1.1 Layout del sistema

Il prototipo è formato da uno scafo semicilindrico al cui interno è disposta una torre che sostiene il generatore (PTO, Power Take Off) al cui albero è vincolato il sistema oscillante pendolo. Le onde mettono in oscillazione lo scafo che a sua volta trasferisce il moto alla cerniera del pendolo, corrispondente all'asse del PTO: il pendolo inizia quindi a oscillare per reazione e trascina in oscillazione l'albero del PTO. Frenando il PTO è possibile estrarre energia dal moto del pendolo e in ultima analisi dal moto delle onde.

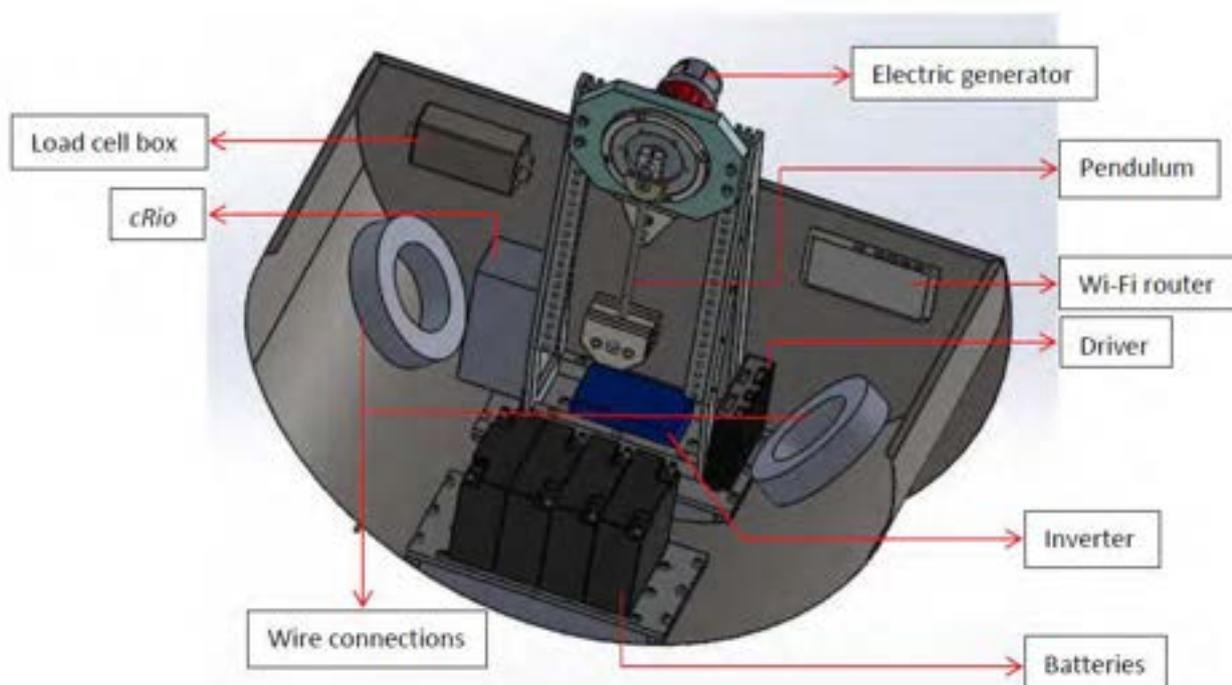


Figura 1 – Layout del prototipo

### 2.1.2 Lo scafo

Lo scafo è costituito da lamiere di acciaio inossidabile da 1 mm di spessore saldate tra loro. Ha forma di semicilindro ad asse orizzontale, con due alette laterali per favorirne l'allineamento rispetto alla direzione d'incidenza dell'onda.

Allo scafo è collegato rigidamente un telaio che supporta la cella di carico, il generatore elettrico e l'intero meccanismo a pendolo.

All'interno dello scafo sotto la base del pendolo sono state inserite le masse di bilanciamento per regolare l'altezza del baricentro rispetto alla linea di galleggiamento. Tale altezza deve essere tale da garantire la stabilità dello scafo sia rispetto il rollio che il beccheggio. La stabilità è intesa come la capacità del sistema di ritrovare l'equilibrio a fronte di una piccola perturbazione.

Con una serie di prove in acqua ferma, si è verificato che posizionando le masse di stabilizzazione nella parte inferiore dello scafo, ottenendo il peso previsto di 75 kg, il sistema è stabile nelle due coordinate di rollio e beccheggio in tutte le condizioni di assetto del generatore.

La massa di zavorra è ottenuta con blocchi di acciaio sagomati, collocati al fondo dello scafo, nello spazio tra le piastre forate di appoggio del telaio e la lamiera semicilindrica.



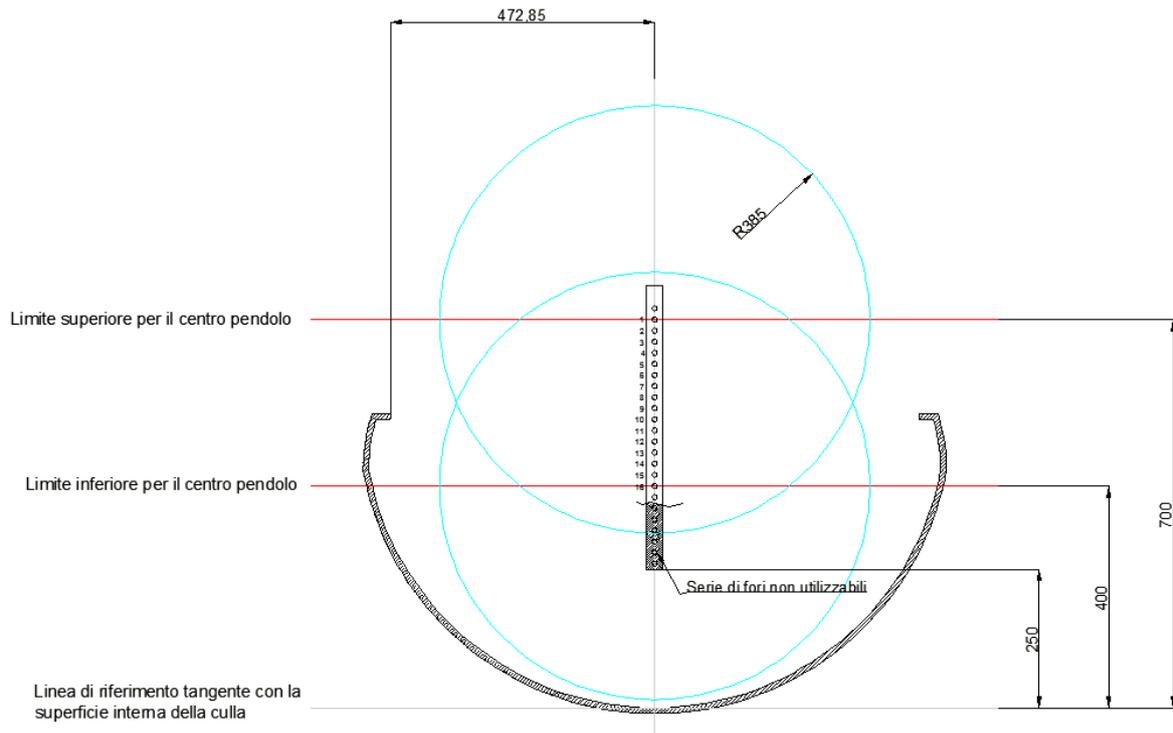
Figura 2 – vista interna del prototipo

### 2.1.3 L'assetto del generatore

Il telaio di sostegno del PTO ha una serie di fori con cui è possibile fissare il generatore a diverse altezze rispetto al fondo dello scafo, in modo da spostare il baricentro dello scafo e conseguentemente la sua risposta in ampiezza.

Il telaio è costituito da elementi di alluminio anodizzato assemblati con viti. Sono possibili 22 differenti settaggi, ma solo 16 sono effettivamente utilizzabili alla massima lunghezza del pendolo per problemi di interferenze tra le parti in movimento.

La Figura 3 mostra i limiti di settaggio della massa oscillante.



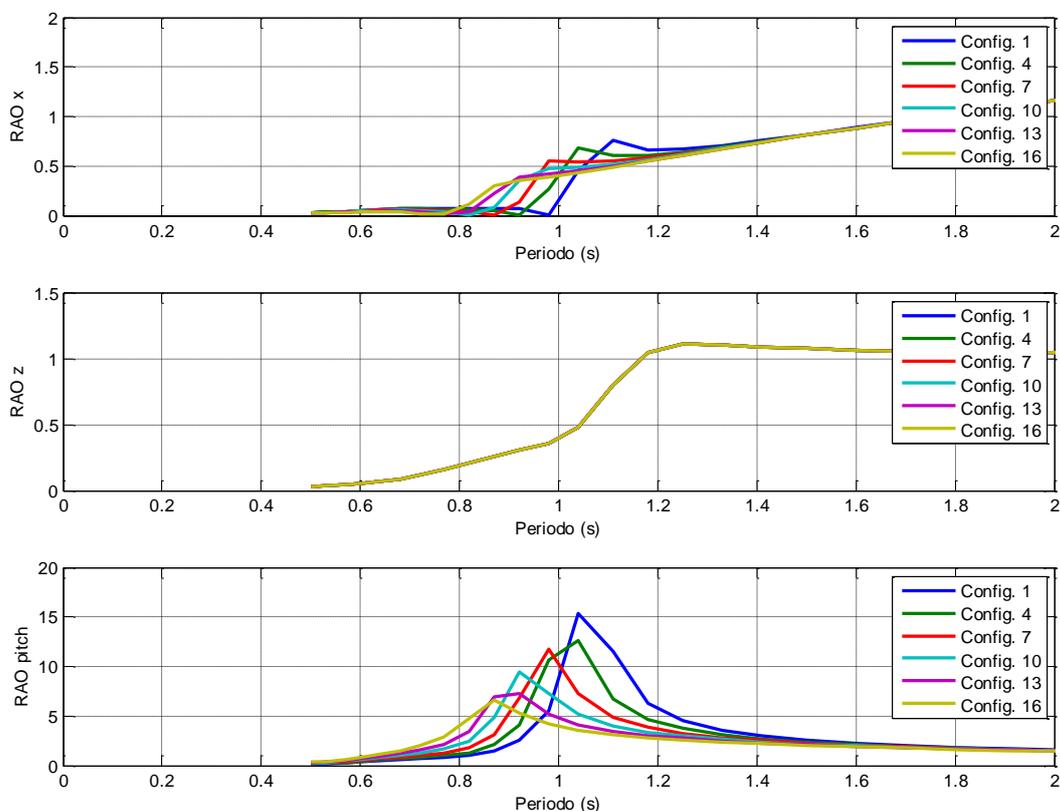
**Figura 3 - Impostazione della posizione della cerniera del pendolo (asse del PTO)**

La Tabella 1 riporta la distanza tra la cerniera del pendolo (distanza CG) e il baricentro dello scafo nelle diverse configurazioni utili.

**Tabella 1 - Configurazioni geometriche del pendolo**

Configurazione n.	Distanza CG m
1	0,50968
2	0,4923
3	0,47493
4	0,45755
5	0,44018
6	0,4228
7	0,40543
8	0,38806
9	0,37068
10	0,35331
11	0,33593
12	0,31856
13	0,30118
14	0,28381
15	0,26643
16	0,24906

Il comportamento idrodinamico dello scafo è stato studiato mediante simulazione numerica con ANSYS AQUA. L'amplificazione dell'oscillazione, espressa dal "Response Amplitude Operator" per le diverse configurazioni è riportato in Figura 4.



**Figura 4 – RAO per le tre coordinate**

Dalle simulazioni numeriche risulta che l'ampiezza di oscillazione maggiore si ottiene per la configurazione n. 1, cioè quella alla massima altezza dal fondo dello scafo. Le prove sperimentali sono state quindi svolte con tale configurazione per cercare le massime produttività di energia.

## 2.2 Svolgimento delle prove

La vasca navale di esecuzione delle prove è il bacino rettilineo n° 2 disponibile presso l'Istituto INSEAN sito in Via di Vallerano 139, 00128 Roma.



Figura 5 – bacini Rettilinei presso INSEAN (n°2 a sinistra, n° 1 a destra)

Quantità	Valore
Lunghezza	220 m
Larghezza	9 m
Profondità	3.5 m
<b>Onda regolare</b>	
Lunghezza d'onda	1 – 10 m
Periodo	0.8 – 2.53 s
Altezza	0.1 – 0.45 m
Pendenza	1 – 9°

Tabella 2 – Caratteristiche del bacino di prova n°2 INSEAN

Le prove consistono nel sottoporre il dispositivo, disposto nella configurazione n. 1, a onde regolari con altezza 0.05 m e periodo da 1 a 1.5 s, per circa 120 secondi.

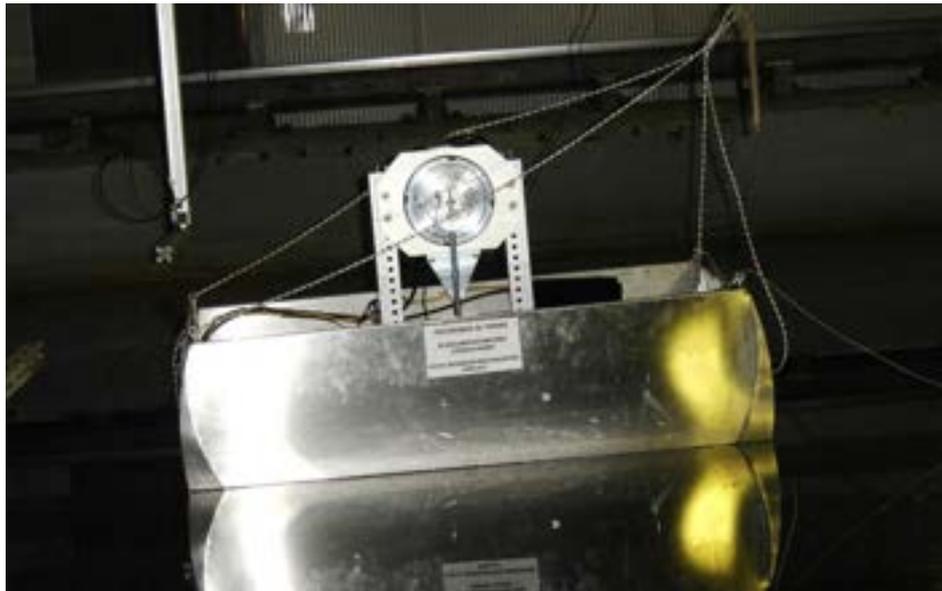
Per impedire il trascinarsi dello scafo lungo il bacino da parte delle onde incidenti, viene installato un sistema di ormeggio ancorato al fondo del canale.

### 2.2.1 Il setup sperimentale

Il prototipo è stato posizionato nel bacino INSEAN, ormeggiato al fondo del canale ed è stato connesso ai sistemi di acquisizione e controllo.



Figura 6 – Varo del prototipo nel bacino



**Figura 7 – Il prototipo in assetto di prova (vista laterale)**



**Figura 8 – Il prototipo in assetto di prova con copertura protettiva per le onde configurazioni ondose più critiche**



Figura 9 – Il banco di controllo e acquisizione

### 2.2.2 Il sistema di ormeggio

Il sistema di ormeggio deve mantenere in posizione il prototipo senza alterarne la dinamica di funzionamento a causa delle forze trasmesse. Si è quindi optato per il sistema rappresentato in Figura 12, nel quale la catena di ormeggio ha un estremo vincolato a una massa appoggiata sul fondo del bacino, è collegata al galleggiante (jumper) e quindi raggiunge lo scafo. La presenza del galleggiante e il lungo tratto di catena che lo congiunge allo scafo fanno sì che il sistema di ormeggio mostri un comportamento elastico non lineare. Tale sistema non influisce sulla dinamica del moto di beccheggio dello scafo e al contempo lo trattiene in prossimità della posizione prescelta.

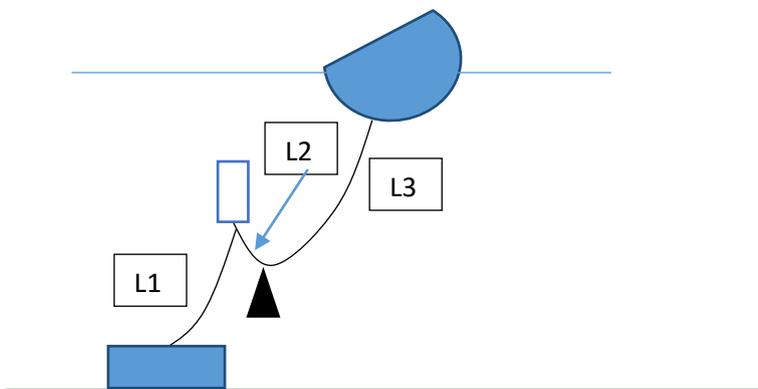


Figura 10 – Il Layout dell'ormeggio.

L1	2 m
L2	0.4 m
L3	2 m
Spinta positiva Jumper	15.37 N
Massa	~0.853 kg
Altezza corpo morto	0.5 m
Profondità dell'acqua	3.2 m

**Tabella 3 – Valori dei parametri di ormeggio.**



**Figura 11 – configurazione dell'ormeggio a secco**



**Figura 12 – Installazione del sistema di ormeggio (operazione di sollevamento e vincolo al corpo morto posto in fondo al bacino)**



**Figura 13 – Sistema di ormeggio in posizione**

### 2.2.3 Misura del profilo dell'onda

Il profilo d'onda è misurato attraverso n° 7 sonde capacitive e n° 4 sonde a ultrasuoni poste come da layout mostrato in figura 14. Le sonde capacitive e a ultrasuoni sono acquisite con due sistemi di acquisizione diversi sincronizzati attraverso il segnale di trigger TTL fornito a inizio prova dal controllore di bordo del PEWEC.

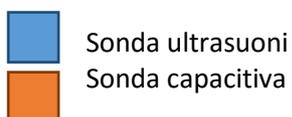
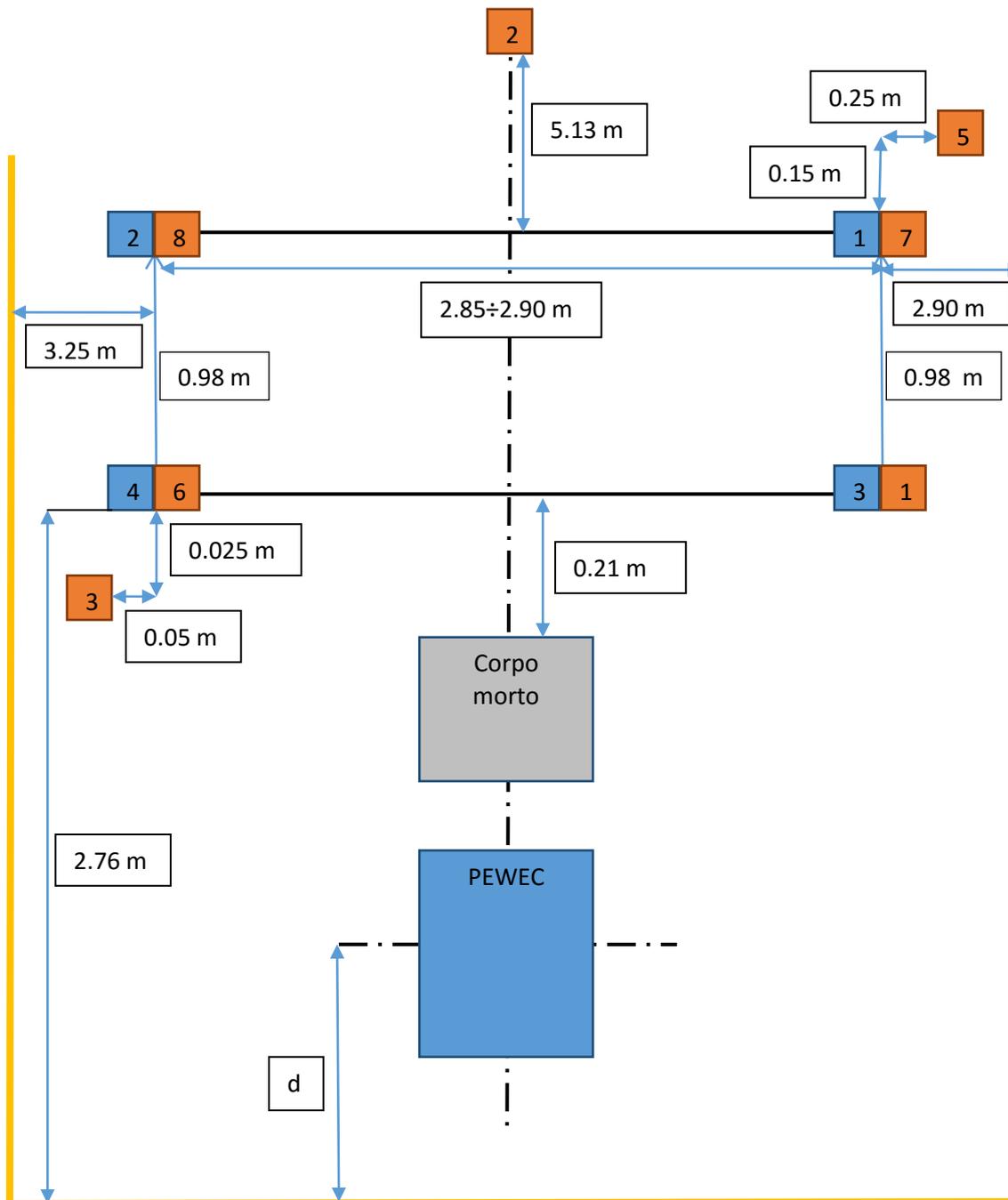


Figura 14 – Layout configurazione delle sonde.



Figura 15 – Testa di misura della sonda capacitiva

**Caratteristiche della sonda dichiarate:**

Tensione di alimentazione:	5V	(da 4,5V a 18V)
Sensibilità (con $R_a=1,2K\Omega$ $R_b=12K\Omega$ ):	s/pF	(da a )
Sensibilità:	s/mm	
Risoluzione teorica:	$\infty$	
Risoluzione del sistema:	Max: conteggi/mm (sonda emersa)	
	Min: conteggi/mm (sonda immersa)	
Risoluzione fisica	Uguale al menisco $\approx \pm 0,5$ mm	
Segnale di uscita:	onda quadra a 5V duty cycle $\approx 50\%$	
Range in frequenza oscillatore:	da 150 KHz ad 1 MHz (1,8MHz a vuoto)	
Frequenza di acquisizione :	50 Hz	
Accuratezza sperimentale	1-2 mm	

Figura 16 – Caratteristiche della sonda capacitiva

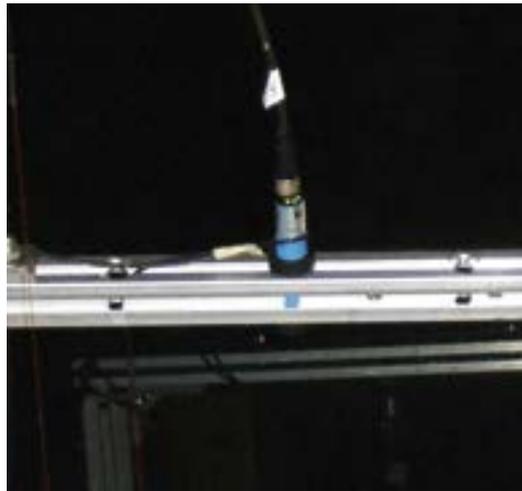


Figura 17 – Le sonde a ultrasuoni per la misura del profilo d’onda

Technical Data	Technische Daten	Données techniques	
Max. sensing distance	Max. Reichweite	Portée	500 mm
Min. sensing distance	Min. Reichweite	Distance minimale	60 mm
Response time 90% of final value	Ansprechzeit auf 90% des Endwertes	Temps de réponse à 90% de la valeur finale	100 ms
Beam angle	Schallkeule	Angle de faisceau	8°
Linearity error	Linearitätsfehler	Erreur de linéarité	<0,3 %
Repeatability of measured distance	Wiederholgenauigkeit des Meßabstandes	Répétabilité	±0,2 % ±1 mm
Temperature range	Temperaturbereich	Température de service	-15 ... +70 °C
Temperature compensation	Temperaturkompensation	Compensation température	Yes/Ja/Oui
Operating voltage	Betriebsspannung	Tension de service	15... 30 Vdc
Possible min. supply	Mögliche min. Versorgung	Min. alimentation possible	12 Vdc
Current consumption	Stromaufnahme	Courant consommé	<40 mA
Output	Ausgang	Sortie	4 ... 20mA
Sensitivity	Steilheit	Sensibilité	Teach In
Teach In	Teach In	Apprentissage	
P1 / P2 determines output position	Der Bereich wird durch P1 und P2 festgelegt	La gamme est défini par les positions P1 et P2.	
Plastic housing	Kunststoffgehäuse	Boîtier plastique	M18x1
Sealing	Schutzart	Étanchéité	IP67
Attention !!! Do not expose sensor head to hot water > 50° C or water steam!!	Achtung !!! Den Sensorkopf nicht heißem Wasser >50°C oder Wasserdampf aussetzen!!	Attention !!! Ne pas mettre en contact continu la tête du capteur avec de l'eau avec une température supérieur à 50 °C ou avec de la vapeur d'eau	
Cable connection	Kabelanschluss	Connexion câble	2 m

Tabella 4 – Caratteristiche del sensore FAE FA 18-500

Le sonde forniscono un’uscita analogica in corrente 4-20 mA che viene convertita in tensione 2-10 V tramite l’inserimento in serie di una resistenza calibrata del valore di 500 Ohm.

La calibrazione del sistema è mostrata in figura 18.

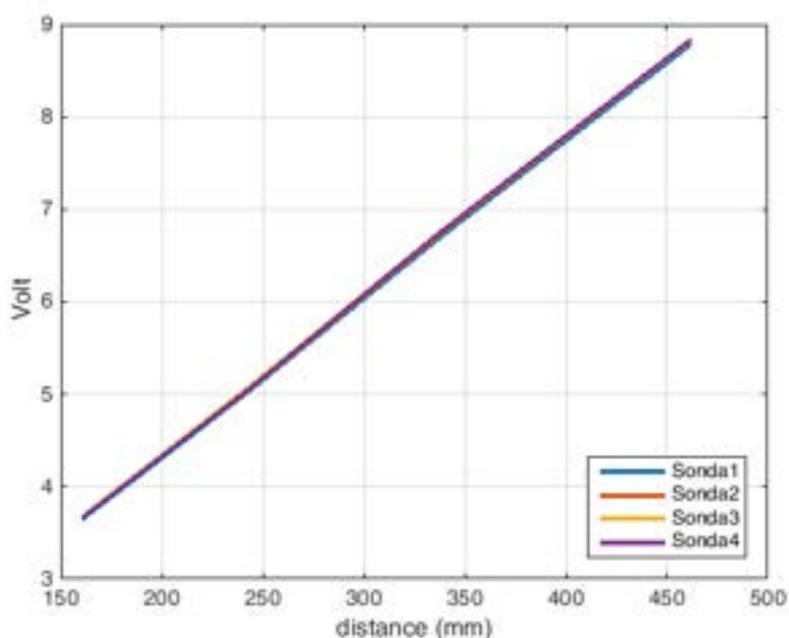


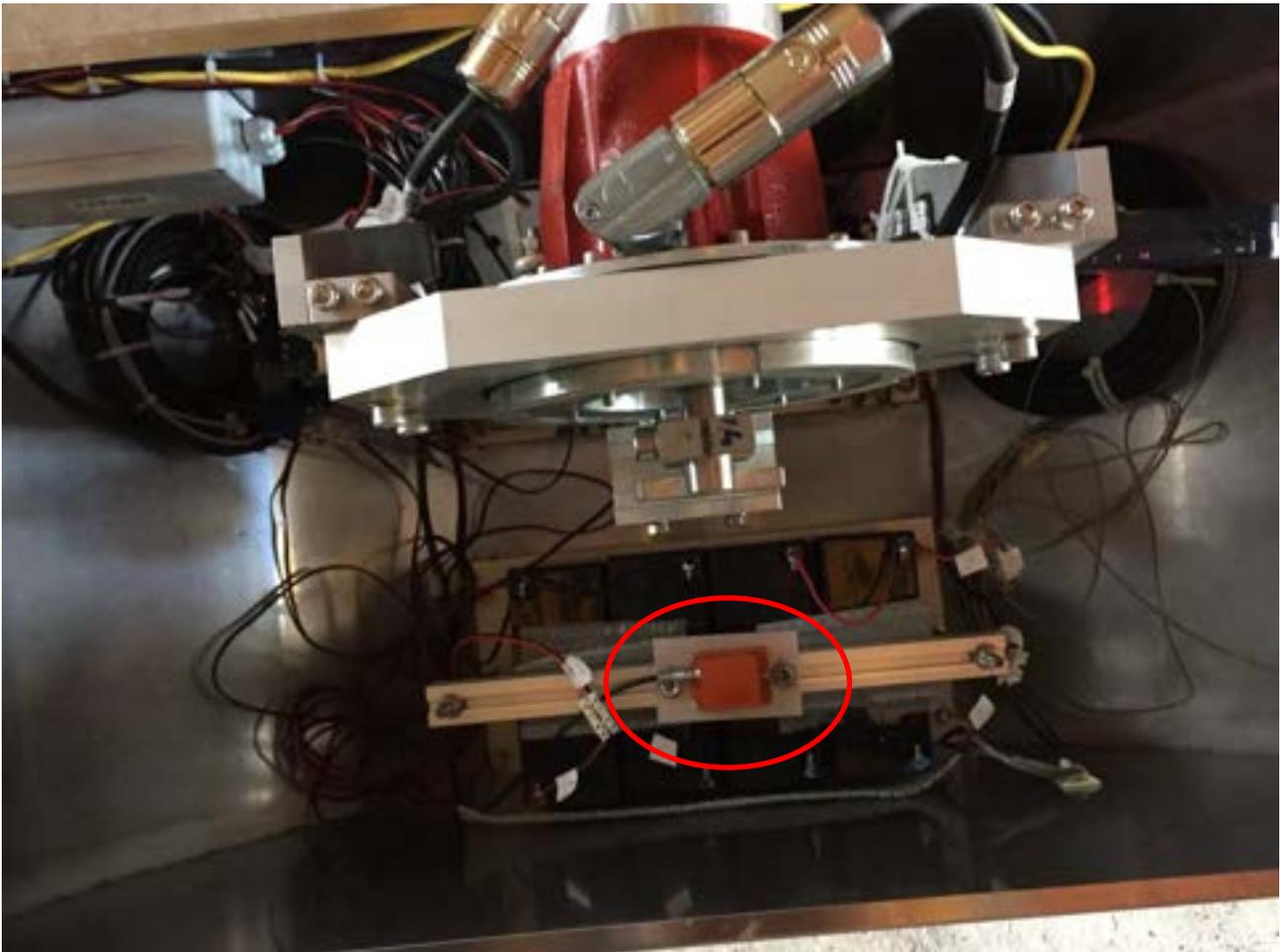
Figura 18 – Caratteristica di misura delle sonde a ultrasuoni.

#### 2.2.4 Misura dell'angolo $\delta$ di beccheggio dello scafo

L'angolo  $\delta$  di beccheggio dello scafo è misurato con il sensore inerziale MTi prodotto da Xsens. Tale sensore grazie ad accelerometri e giroscopi è in grado di misurare posizione e velocità nello spazio del corpo al quale è vincolato. Le caratteristiche del sensore sono mostrate in Tabella 4.

Tabella 5 – Caratteristiche del sensore MTi

Modello	MTi 30
Risoluzione angolare	0.05°
Ripetibilità	0.2°
Peso	50 g
Dimensioni	58 x 58 x 22 mm



**Figura 19 – Posizionamento del sensore MTi all'interno dello scafo**

### 2.2.5 Misura di angolo, velocità e coppia agenti sul PTO

L'angolo e la velocità di oscillazione del pendolo relativi allo scafo sono misurati attraverso il trasduttore resolver integrato nel PTO. Il momento torcente agente sul PTO  $T_e$  può essere stimato tramite la corrente che circola nel PTO, sebbene tale misura indiretta possa essere soggetta a errore (variabilità durante il funzionamento della costante di coppia).

Si è quindi optato per un sistema di misura diretta della coppia composto da una sospensione dello statore del PTO abbinata a un braccio con cella di carico collegata al telaio. In questo modo nota la distanza fra l'asse della cella di carico e l'asse di rotazione del pendolo è possibile misurare la coppia di reazione scaricata dallo statore del PTO sullo scafo.

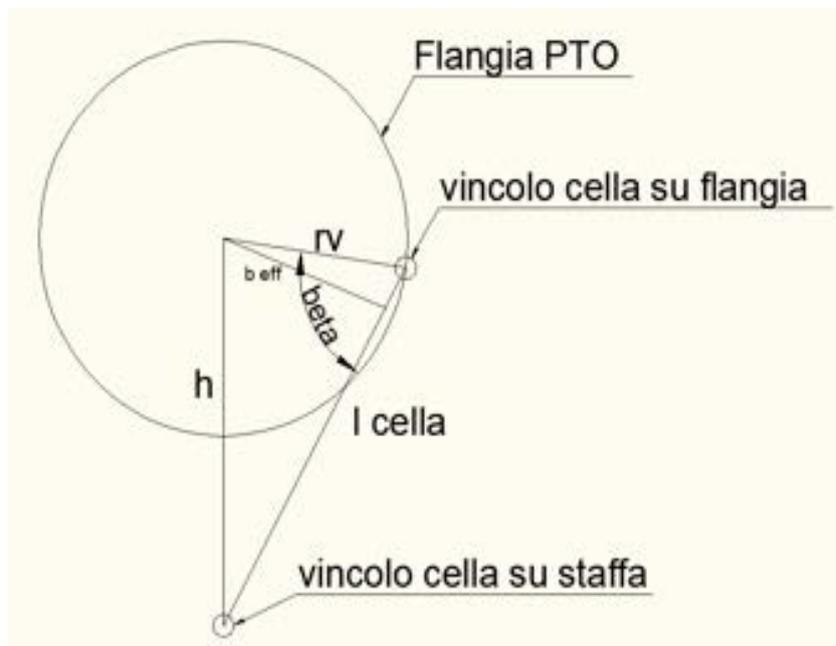
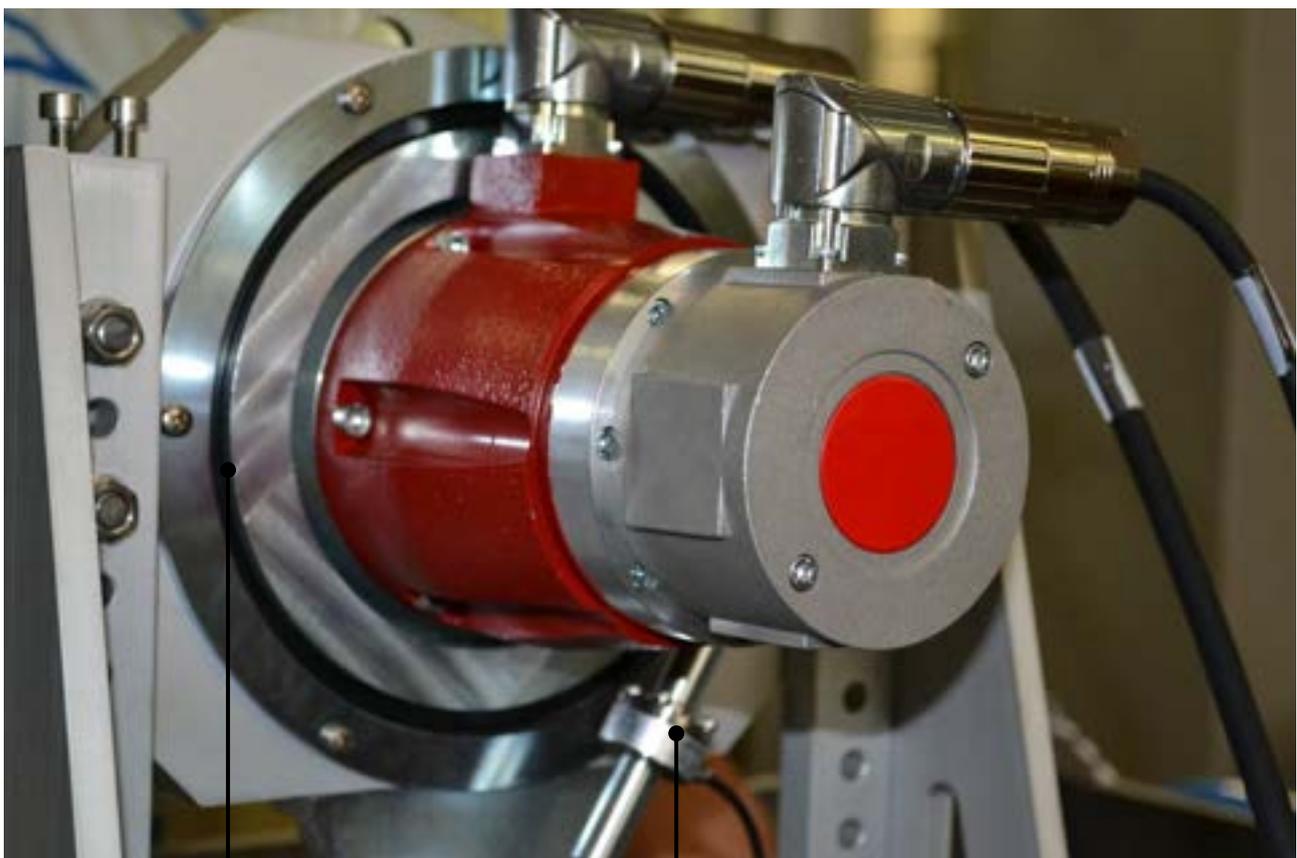


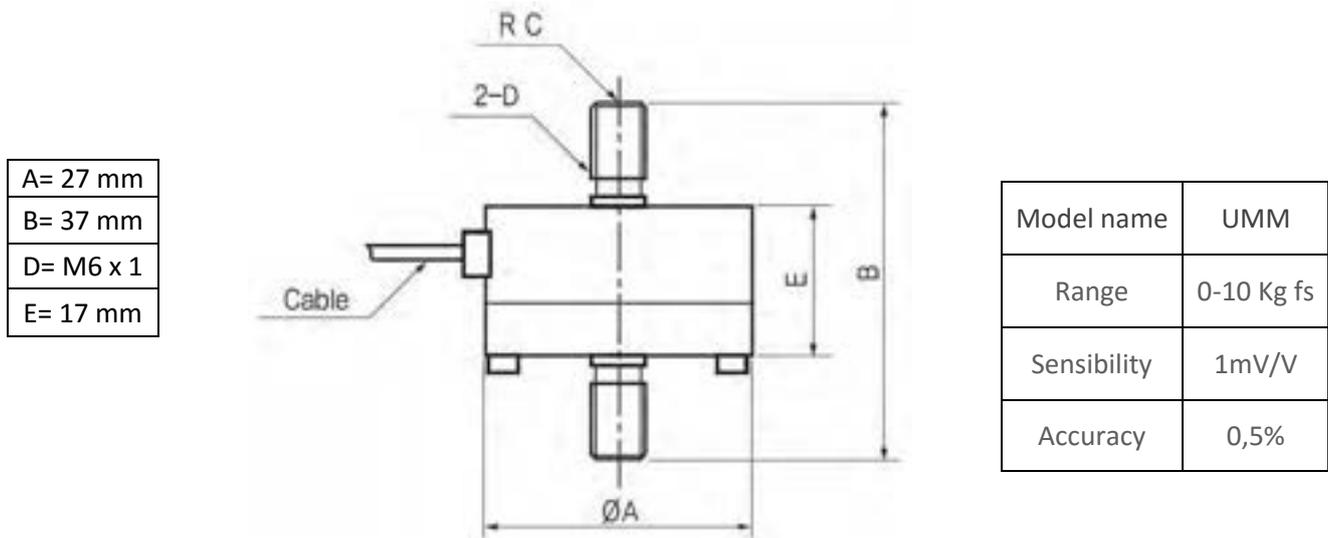
Figura 20 – Il layout di misura della coppia del PTO



Sospensione

Cella di carico

Figura 21 – Foto del layout di misura della coppia del PTO



A= 27 mm
B= 37 mm
D= M6 x 1
E= 17 mm

Model name	UMM
Range	0-10 Kg fs
Sensibility	1mV/V
Accuracy	0,5%

Figura 22 – caratteristiche della cella di carico

Di seguito si riporta la caratteristica di calibrazione del sistema di misura della coppia.

Tabella 6 – Calibrazione del sistema di misura di  $T_e$ .

Torque set (Nm)	Load cell voltage (V)	Epsilon (deg)	Output torque (Nm)
2	0,42	11,97	2,039
1,5	0,25	9,44	1,612
1	0,03	6,31	1,080
0,5	-0,24	3,04	0,521
0	-0,48	0,00	0,000
-0,5	-0,72	-3,02	-0,518
-1	-0,97	-5,94	-1,017
-1,5	-1,28	-9,28	-1,585
-2	-1,56	-12,31	-2,096

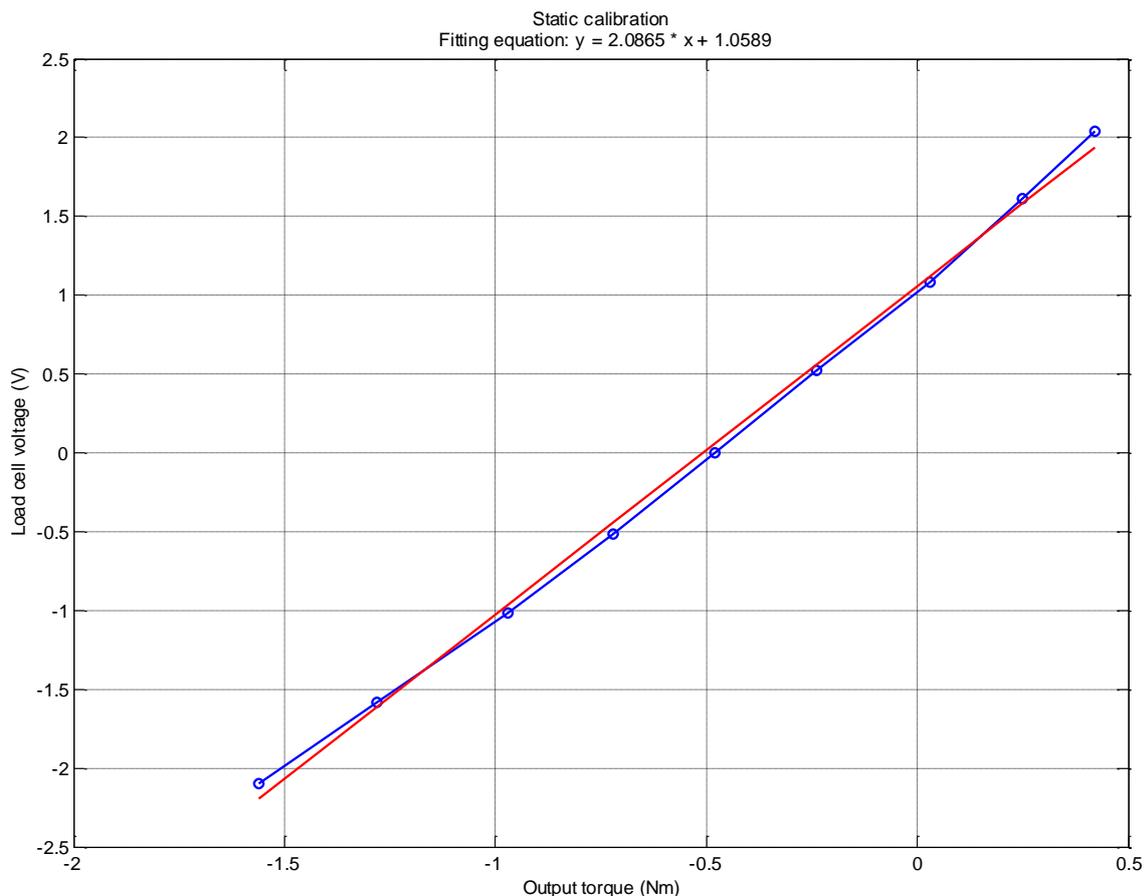


Figura 23 – Curva di calibrazione del sistema di misura della coppia

### 2.2.6 Il sistema di controllo del PTO

La legge di controllo del PTO è uno dei parametri che permettono di variare la coppia scambiata tra PTO e pendolo oscillante, variando così l'assorbimento di potenza da parte del sistema.

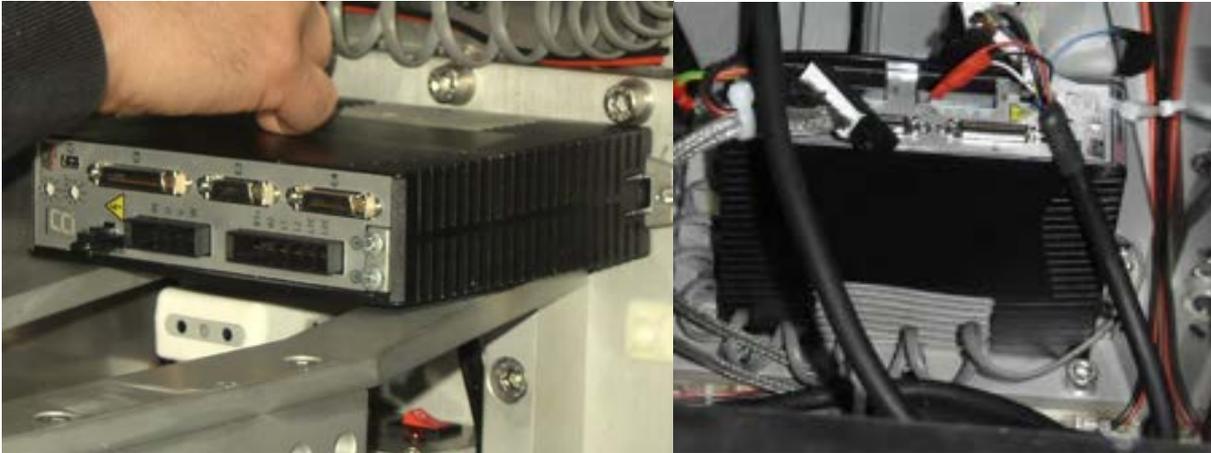
In queste prove il PTO è stato regolato in modo da comportarsi come un sistema molla smorzatore, con costante di elasticità  $k$  e coefficiente di smorzamento  $c$ .

$$T_{\varepsilon} = k\varepsilon + c\dot{\varepsilon}$$

La legge di controllo è implementata tramite il sistema National Instruments CompactRio. Il cRio è un controllore con intelligenza a bordo e con moduli di I/O per interfacciarsi al sistema da controllare. Nel nostro caso il cRIO esegue le seguenti operazioni:

1. Lettura di posizione e velocità dal driver del PTO
2. Lettura del segnale analogico proveniente dalla cella di carico
3. Valutazione della legge di controllo e invio del valore di coppia desiderata al driver del PTO

Il driver di controllo del PTO è un servosistema di controllo coppia che a partire da un set fornito di coppia lo impone sull'asse del PTO. Tale driver fornisce in uscita le grandezze posizione e velocità del PTO e comunica con il cRio tramite protocollo seriale.



**Figura 24 – Il driver del PTO**



**Figura 25 – Il sistema NI cRio**

In modo da non perturbare la dinamica dello scafo e quindi indurre possibili errori di prova, il prototipo è stato progettato in modo da non necessitare l'utilizzo di cavi esterni che inducendo azioni sullo scafo ne variano il comportamento idrodinamico.

I cavi rimossi sono quelli relativi all'alimentazione energetica del sistema, alla trasmissione dei segnali acquisiti e alla sincronizzazione delle grandezze di bordo con quelle di vasca (trigger):

1. Il prototipo è completamente autonomo dal punto di vista energetico e non necessita di connessioni esterne. La fonte di energia è composta da 4 batterie a 12 V da 18Ah ciascuna. Le batterie sono organizzate in due pacchi separati composti di due batterie l'uno per la generazione delle tensioni 12 V cc e del 24 Vcc. La linea a 12 V è collegata all'inverter che alimenta il driver del PTO e il router WiFi a 230 Vac, mentre la linea a 24 V alimenta il controllore cRio e i sensori di bordo.

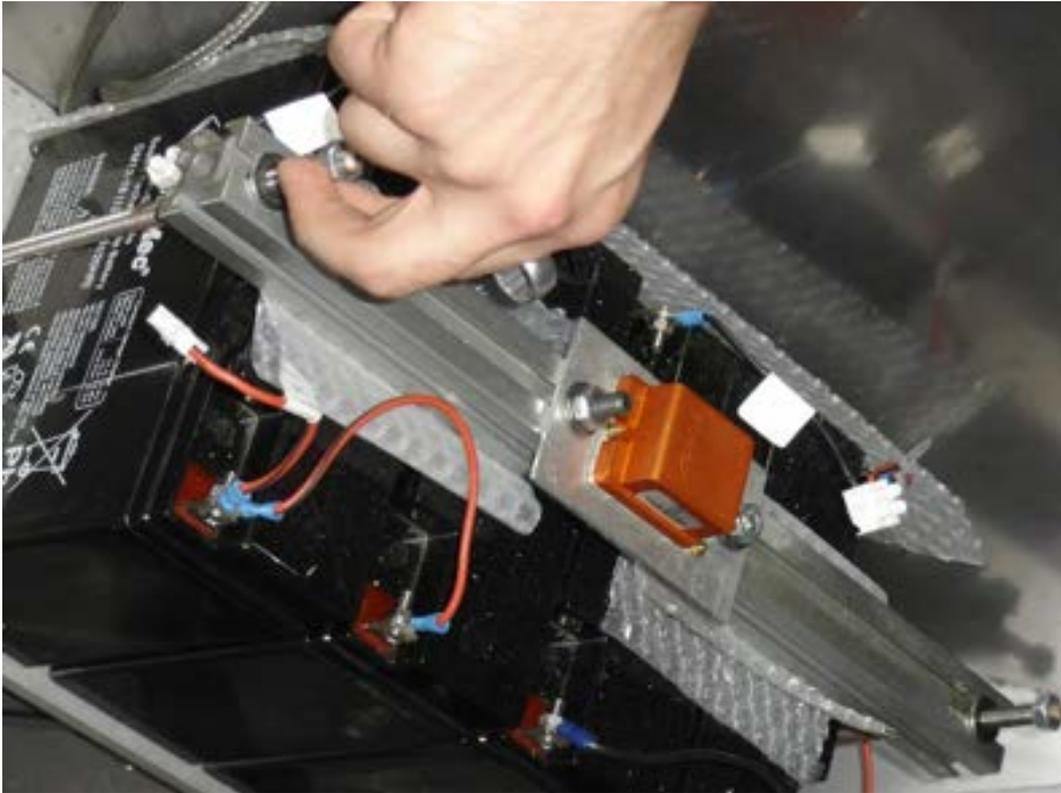


Figura 26 – Le batterie di bordo

2. Lo scambio di dati avviene senza l'utilizzo di cavi, in quanto il controllore cRio che funge da hub per l'acquisizione e il controllo dialoga con il PC di bordo vasca tramite rete WiFi ad hoc. Tale rete permette la configurazione dei coefficienti smorzanti ed elastici del PTO, l'avvio delle prove e lo scambio dei dati a termine prova.



Figura 27 – Il router Wifi

3. La sincronizzazione delle grandezze di bordo con quelle della vasca avviene tramite un segnale di trigger wifi lanciato dal controllore cRio e recepito a bordo vasca come segnale digitale TTL dall'acquisitore INSEAN. In modo da evitare l'utilizzo di cavi per la trasmissione di questo segnale è stato modificato un sistema wireless di accoppiamento macchina fotografica / flash remoto di tipo professionale. Tale sistema permette l'invio a decine di metri di un segnale di trigger senza l'utilizzo di cavi.



Figura 28 – Il trigger WiFi

Il sistema di controllo e acquisizione implementato tramite il controllore cRio e anche i sistemi di acquisizione delle sonde sono lavorano con una frequenza di campionamento di 50 Hz.

#### 2.2.7 Metodologia di esecuzione delle prove

Le prove sono state svolte con la seguente procedura.

1. Avvio del sistema di acquisizione dell'onda tramite sonde capacitive
2. Avvio del sistema di acquisizione del profilo d'onda tramite sonde a ultrasuoni
3. Avvio del sistema di controllo cRio che fornisce il segnale di trigger per gli acquisitori d'onda
4. Avvio del battitore e generazione dell'onda
5. Tempo di prova di circa 120 s
6. Spegnimento del battitore
7. Spegnimento del sistema di controllo del PTO (CompactRio) e conseguente spegnimento automatico del sistema di acquisizione del profilo d'onda
8. Attesa di circa 20 minuti per la stabilizzazione del bacino di prova

Sono state svolte tre tipologie di prova

1. Prove per l'identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato
2. Prove di risposta in frequenza con coefficiente di smorzamento pari a 0.5 Nms/rad e rigidità nulla
3. Prove con onda a periodo  $T = 1.3$  s,  $c = 0.5$  Nms/rad e rigidità variabile

Le prove sono state eseguite mantenendo costante l'altezza dell'onda generata; ne è stato variato il periodo, al fine di valutare le prestazioni del sistema per diverse frequenze di onda regolar incidente.

I parametri di prova sono riportati in Tabella 5, mentre i parametri di configurazione del prototipo sono riportati in Tabella 6.

**Tabella 7 – Onde di prova**

Parametro	Valore
Altezza d’onda picco-picco (m)	0.05
Periodo d’onda (s)	1 – 1.1 – 1.2 – 1.3 – 1.4 – 1.5

**Tabella 8 – Impostazioni del prototipo**

Parametro	Valore
PTO	Configurazione n°1
Lunghezza pendolo	0.334 m
Massa oscillante	3 kg
Massa prototipo	75 kg
Costante di elasticità del PTO (k)	-5, -2, -1, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 1, 2 Nm/rad
Coefficiente di smorzamento del PTO (c)	0.5 Nms/rad
Distanza del sistema dal battitore	60 m

### 2.3 Risultati delle prove

Ogni prova acquisita durante i test è stata analizzata per valutare le performances del sistema.

Si possono così vedere gli andamenti di:

- $\varepsilon(t)$  = rotazione relativa pendolo-scafo
- $\dot{\varepsilon}(t)$  = velocità angolare relativa pendolo-scafo
- $T_{PTO}$  = coppia agente sull’asse del generatore
- $P_{PTO}$  = potenza assorbita dal generatore
- $\delta(t)$  = angolo di beccheggio scafo

#### 2.3.1 Prove per l’identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato

La prime serie di prove eseguite a pendolo bloccato hanno permesso di identificare il RAO nel range di frequenza  $\omega$ , nel nostro caso, di periodi di interesse.

La Figura 29 mostra l’andamento tipico dell’angolo di beccheggio di una prova a pendolo bloccato per periodo 1.2 s:

- a. Primo periodo iniziale nel quale l’onda percorre il tragitto dal battitore al prototipo fino a 130 s circa
- b. Fra 130 s e 280 s in cui il sistema è sottoposto alla rampa di inizio del treno d’onda di 20 cicli e seguentemente si ha un assestamento del sistema di ormeggio fino a giungere alla posizione di lavoro intorno ai 280 s
- c. Un tratto di operazione stabile fra i 280 s e i 380 s circa
- d. Il sopraggiungere delle riflessioni dal fondo della vasca dai 380 s in poi e la rampa di discesa del treno d’onde

Ogni periodo d’onda ha il suo andamento caratteristico in funzione della sua velocità di propagazione e dell’interazione con il sistema.

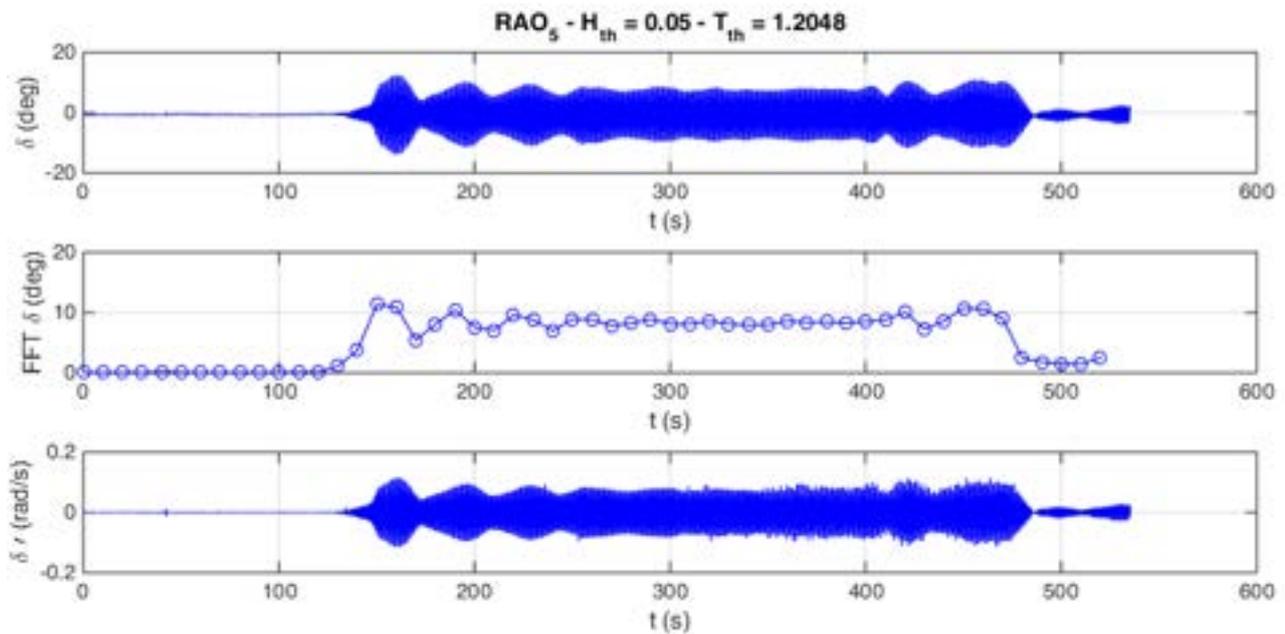


Figura 29 – Andamento temporale dell’angolo e velocità di beccheggio e picco della trasformata di Fourier a finestra mobile.

La stessa analisi è fatta per l’andamento nel tempo dell’elevazione dell’onda e, tramite il rapporto delle densità spettrali di potenza per le frequenze d’interesse è possibile determinare il RAO (Response Amplitude Operator) dello scafo, mostrato in Figura 30. Si nota come lo scafo presenti un picco della risposta per 1.3s, periodo per il quale si svolgerà gran parte delle prove. Il RAO è stato valutato usando le 4 sonde a ultrasuoni dando risultati comparabili.

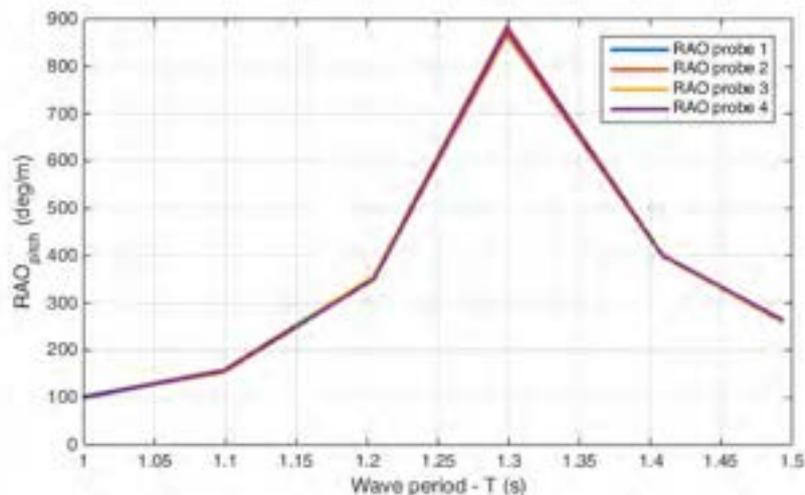


Figura 30 – RAO del prototipo con pendolo bloccato.

### 2.3.2 Prove di risposta in frequenza con coefficiente di smorzamento pari a 0.5 Nms/rad e rigidità nulla

Le figure seguenti mostrano le prove a periodo variabile e smorzamento fisso pari a 0.5 Nms/rad, valore ritenuto ottimale in base alla campagna di prove svolta presso il Politecnico di Torino nel 2014.

Nei diagrammi riportati in figura 18 sono mostrati gli andamenti temporali delle grandezze del PTO per la prova con periodo d'onda 1.3 s e coefficiente di smorzamento del PTO pari a 0.5 Nms/rad.

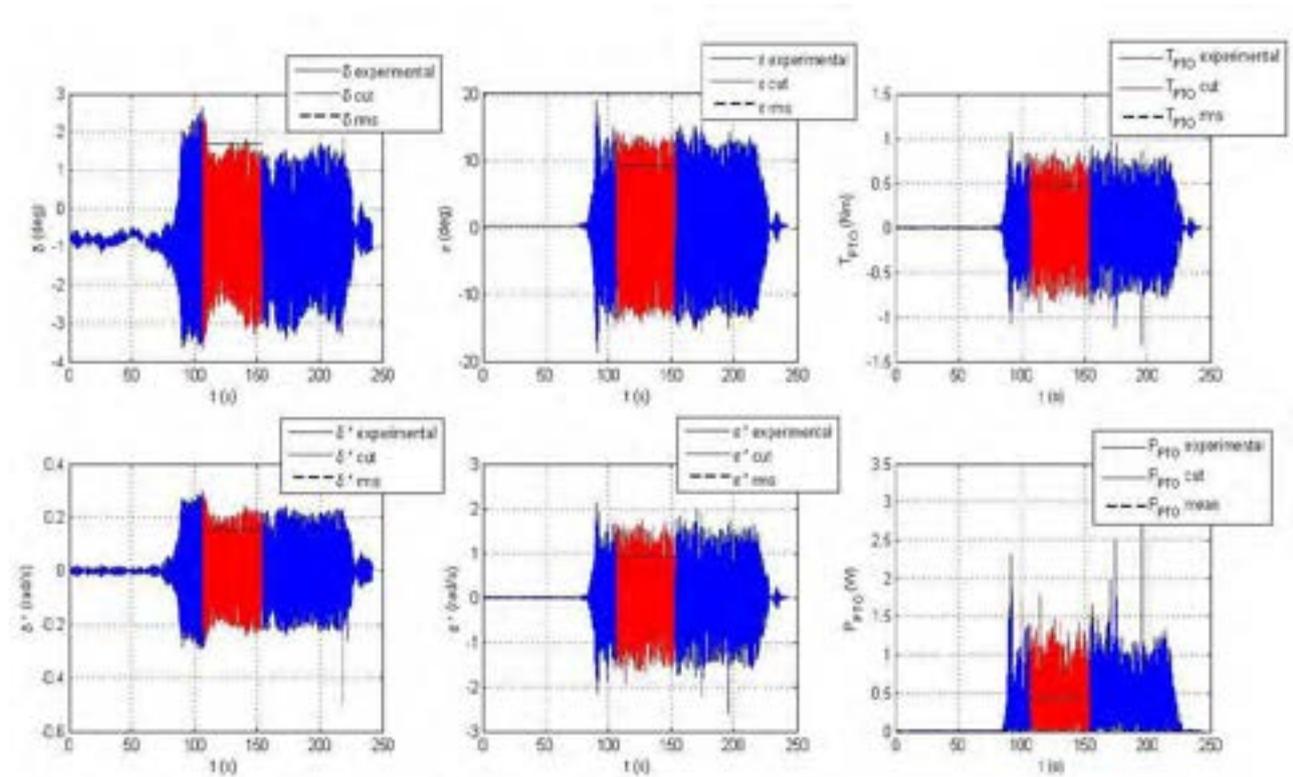


Figura 31 – Grandezze misurate ( $T = 1.1$  s,  $c = 0.5$  Nms/rad)

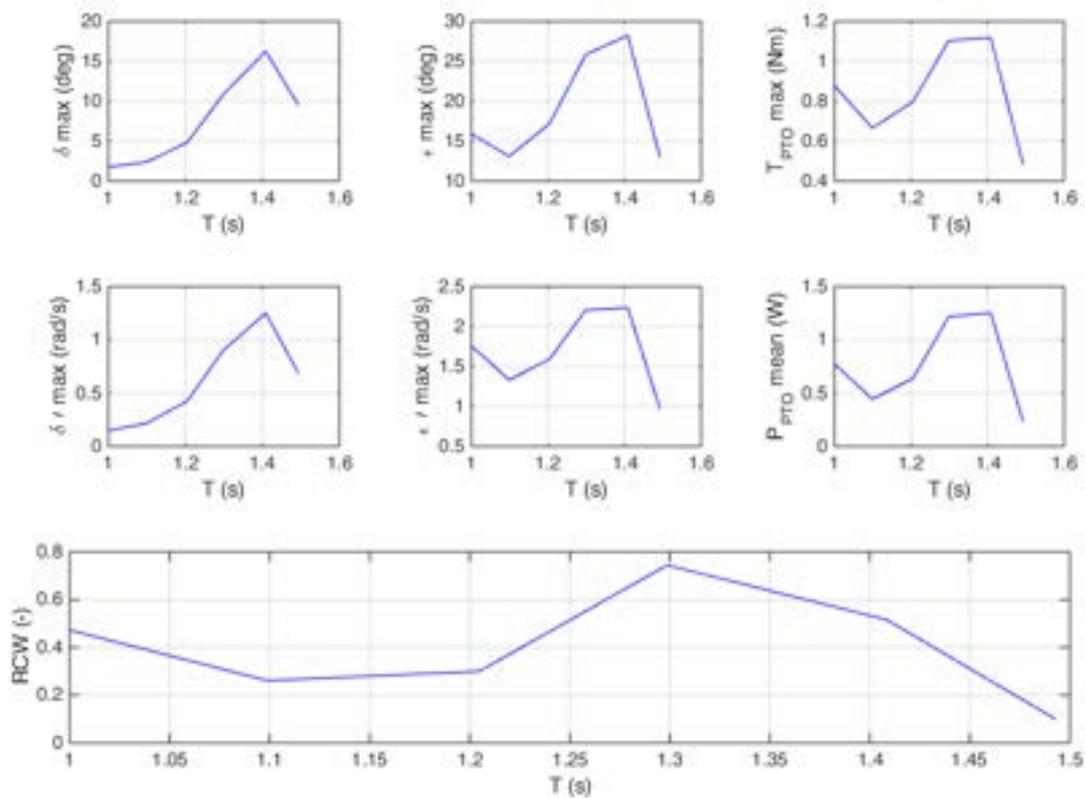


Figura 32 – Sintesi delle grandezze di prova

La Relative Capture Width è il rapporto fra la potenza uscente dal PTO e la potenza ondosa in ingresso. La potenza ondosa in ingresso è il prodotto fra la densità di potenza  $P_w$  (W/m) e la larghezza dello scafo  $W$  (m).

$$RCW = \frac{P_{PTO}}{P_w \cdot W}$$

Di seguito si confrontano le RCW conseguite nel 2014 presso il canale di prova del Politecnico e nel 2015 presso la vasca prova INSEAN: si nota come le capacità di cattura energetica sia considerevolmente maggiore nella nuova campagna del 2015, con incrementi del parametro RCW fino al +115%. Le maggiori dimensioni della vasca prova e il migliorato layout wireless permettono di ridurre le resistenze nel movimento dello scafo (sfregamento contro le pareti nel canale del Politecnico di Torino e presenza dei cavi di collegamento) che quindi è in grado di trasferire maggiore energia al pendolo ovvero al PTO.

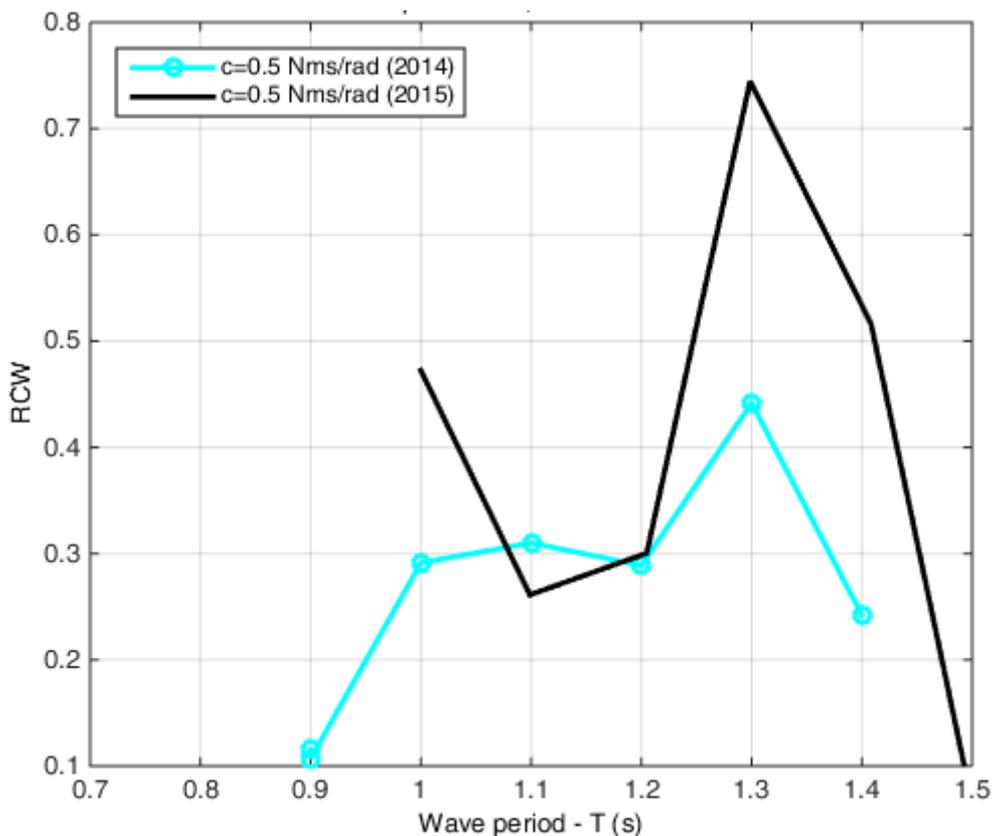


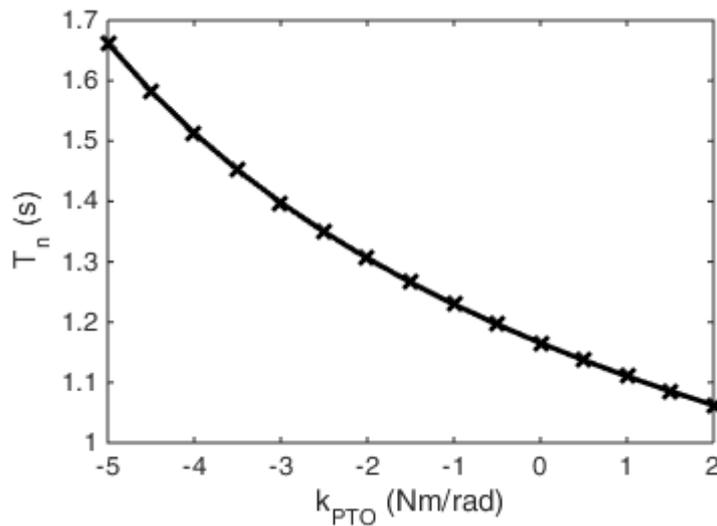
Figura 33 – Confronto fra risultati sperimentali 2014 e 2015

Tabella 9 – Relative Capture Width 2014 e 2015

T (s)	RCW 2015	RCW 2014	2015/2014
0.9	-	0.1071	-
1.0	0.47	0.29	62.2%
1.1	0.26	0.31	-15.8%
1.2	0.30	0.29	4.1%
1.3	0.74	0.44	68.5%
1.4	0.52	0.24	113.0%
1.5	0.10	-	-

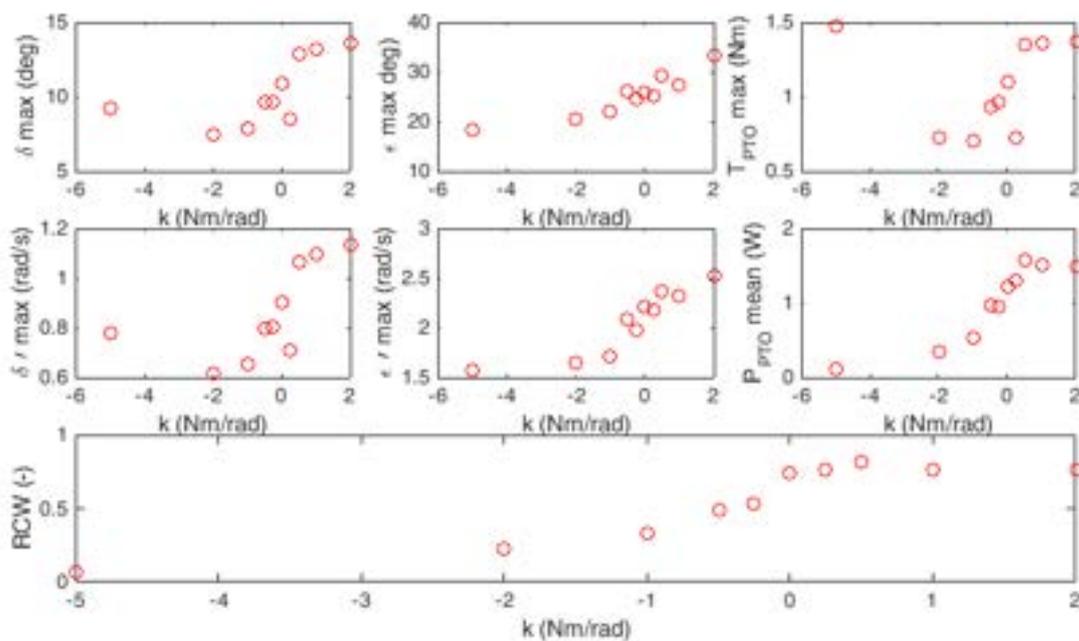
2.3.3 Prove con onda a periodo T = 1.3 s, c = 0.5 Nms/rad e rigidità variabile

In questo set di prove si desidera usare il PTO per variare il periodo naturale del pendolo. Tale operazione è utile nel caso si desideri operare una regolazione della capacità di assorbimento del PEWEC senza spostamento di masse (variazione lunghezza pendolo, altezza cerniera, variazione masse scafo). Inserendo una costante elastica oltre a quella smorzante nella legge di controllo del generatore è possibile variare il periodo naturale del pendolo come indicato in Figura 34.



**Figura 34 – Variazione del periodo naturale del pendolo in funzione della costante elastica impostata sul PTO.**

Di seguito si mostrano gli andamenti sintetici delle grandezze acquisite durante le prove di variazione della costante elastica. Si può notare che la variazione della costante elastica produce un aumento pari all'11 % della Relative Capture Width che passa da 0.74 per  $k = 0$  Nm/rad a 0.82 per  $k = 0.5$  Nm/rad. Costanti elastiche negative producono esclusivamente una riduzione delle prestazioni.



**Figura 35 – Sintesi delle grandezze di prova**

### 3 Conclusioni

Nel presente lavoro si è mostrata l'attività di sperimentazione sul prototipo di sistema di conversione di energia da moto ondoso a massa oscillante. In tale sistema le onde provocano l'oscillazione dello scafo che viene trasmessa al pendolo contenuto internamente. Il moto relativo scafo-pendolo attiva un generatore che produce energia elettrica.

Il prototipo in scala realizzato in collaborazione con ENEA è stato provato sperimentalmente presso il bacino di prova n° 2 dell'INSEAN. I test sono stati effettuati con onda regolare in un intervallo di periodi compreso fra 1 e 1.5 s, in modo da avere una risposta del sistema per le diverse frequenze dell'onda incidente. In questa prima fase il coefficiente di smorzamento del PTO è stato impostato a 0.5 Nms/rad, valore ottimale ricavato dalla precedente campagna di prova presso il Politecnico di Torino nel 2014. In una seconda serie di prove il parametro di costante elastica della legge di controllo del generatore è stato variato per identificare le massime potenze estraibili nelle condizioni di risonanza dello scafo.

La modifica del presente layout di prova rispetto a quello del 2014 riguarda la messa a punto di un sistema di controllo del prototipo wireless (telemetria) per evitare l'influenza dei cavi di segnale e di potenza sulla dinamica del sistema. Inoltre lo svolgimento delle prove in un bacino con maggiore larghezza e maggiore profondità dell'acqua garantisce la riduzione delle interazioni del sistema con il fondale e le pareti.

Le modifiche apportate al layout hanno permesso di incrementare del 115 % la capacità di assorbimento dell'energia ondosa (Relative Capture Width, RWC) del prototipo in condizioni di risonanza.

Infine un miglioramento della legge di controllo, con l'inserimento di una legge elastica, ha permesso un ulteriore miglioramento del parametro RCW dell'11%.

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] Nicola Pozzi, *Modeling and testing of a Wave Energy Converter*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Ottobre 2014
- [2] Giovanni Rinaldi, *Approcci fisico-matematici per lo sviluppo di dispositivi inerziali per la produzione di energia dal moto ondoso*, Rapporto tecnico ENEA (in preparazione)
- [3] Simone Drocco, *Analisi dinamica di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso con architettura a pendolo*, Tesi di Laurea Politecnico di Torino
- [4] Giovanni Bracco et al., *A Pendulum based Wave Energy System*, atti del convegno "Energia dal mare – Le nuove tecnologie per i mari italiani", ENEA 1 e 2 luglio 2014  
[http://www.enea.it/it/enea\\_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2](http://www.enea.it/it/enea_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2)
- [5] Stefano Roveda, *EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PENDULUM BASED INERTIAL SEA WAVES CONVERTER* Bachelor Thesis, Politecnico di Torino, 2014.
- [6] Perez, Tristan, and Thor I. Fossen. "A matlab toolbox for parametric identification of radiation-force models of ships and offshore structures." (2009): 1-15.
- [7] Fossen, Thor I., and Øyvind N. Smogeli. "Nonlinear time-domain strip theory formulation for low-speed manoeuvring and station-keeping." *Modeling, identification and control* 25.4 (2004): 201-221.
- [8] EquiMar Deliverable 3.3 "Assessment of current practice for tank testing of small marine energy devices", Accessed September 2014, <http://www.equimar.org/equimar-project-deliverables.html>



Ricerca di Sistema elettrico

## Parte B: Attività sperimentali sul dispositivo PEWEC in scala 1:12

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi, E. Giovannini,  
A. Fontanella, G. Sannino

## PARTE B: ATTIVITÀ SPERIMENTALI SUL DISPOSITIVO PEWEC IN SCALA 1:12

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi (Politecnico di Torino),  
E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: Sviluppo di un sistema oscillante passivo per il recupero di energia dal moto ondoso

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Progettazione e sperimentazione in vasca di un modello in scala 1:12 di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Prof. Giuliana Mattiazzo

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1.1 <i>Layout del sistema</i> .....	5
2.1.2 <i>Lo scafo</i> .....	6
2.2 SVOLGIMENTO DELLE PROVE.....	7
2.2.1 <i>Il setup sperimentale</i> .....	8
2.2.2 <i>Il sistema di ormeggio</i> .....	10
2.2.3 <i>Misura del profilo dell'onda</i> .....	13
2.2.4 <i>Misura dell'angolo <math>\delta</math> di beccheggio dello scafo</i> .....	16
2.2.5 <i>Misura di angolo, velocità e coppia agenti sul PTO</i> .....	17
2.2.6 <i>Il sistema di controllo del PTO</i> .....	21
2.2.7 <i>Metodologia di esecuzione delle prove</i> .....	24
2.3 TIPOLOGIA DI PROVE ESEGUITE.....	25
2.4 PROVE PER LA VERIFICA DELLA QUALITÀ DELL'ONDA.....	25
2.5 RISULTATI DELLE PROVE.....	26
2.5.1 <i>Prove per l'identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato</i> .....	26
2.5.2 <i>Prove di risposta in frequenza con onda regolare con coefficiente di smorzamento pari a 40 Nms/rad</i> ...	28
2.5.3 <i>Prove con onda regolare a periodo <math>T = 2 - 2.2 - 2.5</math> s, <math>c = 40-600</math> Nms/rad</i> .....	29
2.5.4 <i>Prove in onda irregolare al variare della configurazione del sistema</i> .....	32
3 CONCLUSIONI.....	33
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	34
5 APPENDICE 1.....	36

## Sommario

Le attività svolte nell'ambito dell'accordo di Collaborazione tra ENEA e Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, hanno riguardato la progettazione, realizzazione e sperimentazione di un sistema di conversione dell'energia da moto ondoso a massa oscillante.

Nel presente lavoro si mostra l'attività di sperimentazione sul prototipo del sistema di conversione di energia da moto ondoso a massa oscillante in scala 1:12. In tale sistema le onde provocano l'oscillazione dello scafo che la trasmette al pendolo contenuto internamente. Il moto relativo scafo-pendolo attiva un generatore che produce energia elettrica.

In questo report si descrive il setup di prova, le metodologie di analisi dei dati e le prestazioni del conseguite dal prototipo.

## 1 Introduzione

Oggetto dell'Accordo di Collaborazione è la progettazione, realizzazione e sperimentazione in scala 1:12 di un sistema di produzione di energia da moto ondoso a massa oscillante.

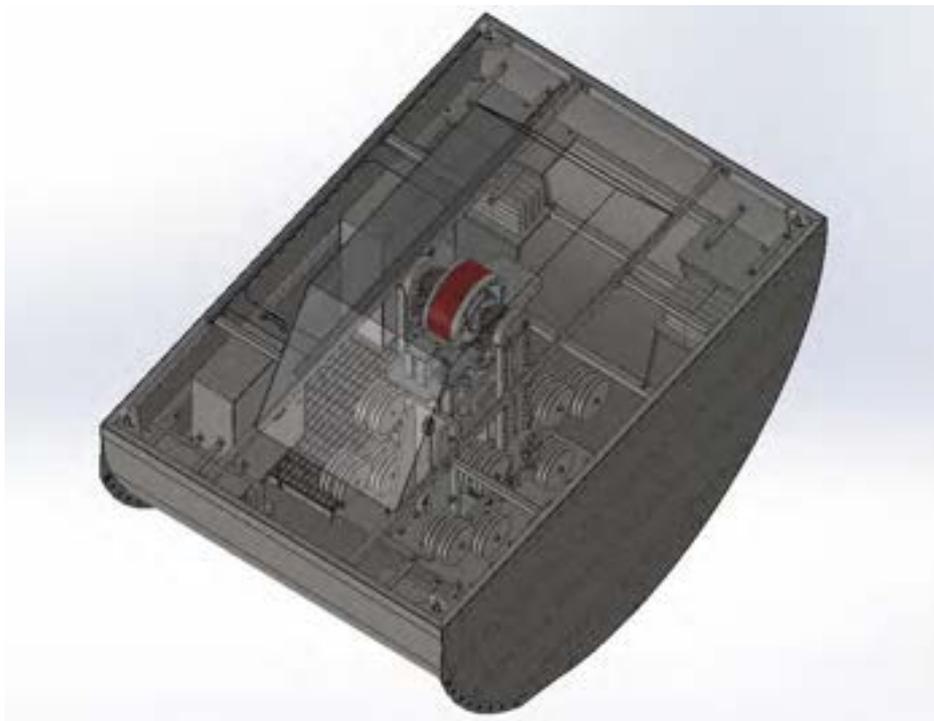
Il prototipo è stato progettato in collaborazione ENEA – Politecnico di Torino.

In questa campagna di test il sistema PEWEC 1:12 è stato sottoposto a condizioni ondose regolari e irregolari presso il bacino INSEAN per valutarne le prestazioni.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1.1 Layout del sistema

Il prototipo è formato da uno scafo semicilindrico al cui interno è disposta una torre che sostiene il generatore (PTO, Power Take Off) al cui albero è vincolato il sistema oscillante pendolo. Le onde mettono in oscillazione lo scafo che a sua volta trasferisce il moto alla cerniera del pendolo, corrispondente all'asse del PTO: il pendolo inizia quindi a oscillare per reazione e trascina in oscillazione l'albero del PTO. Frenando il PTO è possibile estrarre energia dal moto del pendolo e in ultima analisi dal moto delle onde.



**Figura 1 – Layout del prototipo**

### 2.1.2 Lo scafo

Lo scafo è costituito da lamiere di acciaio inossidabile da 4 mm di spessore saldate tra loro. Ha forma di semicilindro ad asse orizzontale.

Allo scafo è collegato rigidamente un telaio che supporta la cella di carico, il generatore elettrico e l'intero meccanismo a pendolo.

All'interno dello scafo sotto la base del pendolo sono state inserite le masse di bilanciamento per regolare l'altezza del baricentro rispetto alla linea di galleggiamento. Tale altezza deve essere tale da garantire la stabilità dello scafo sia rispetto il rollio che il beccheggio. La stabilità è intesa come la capacità del sistema di ritrovare l'equilibrio a fronte di una piccola perturbazione.

La massa di zavorra è ottenuta con blocchi di acciaio sagomati, collocati al fondo dello scafo e su appositi ripiani.

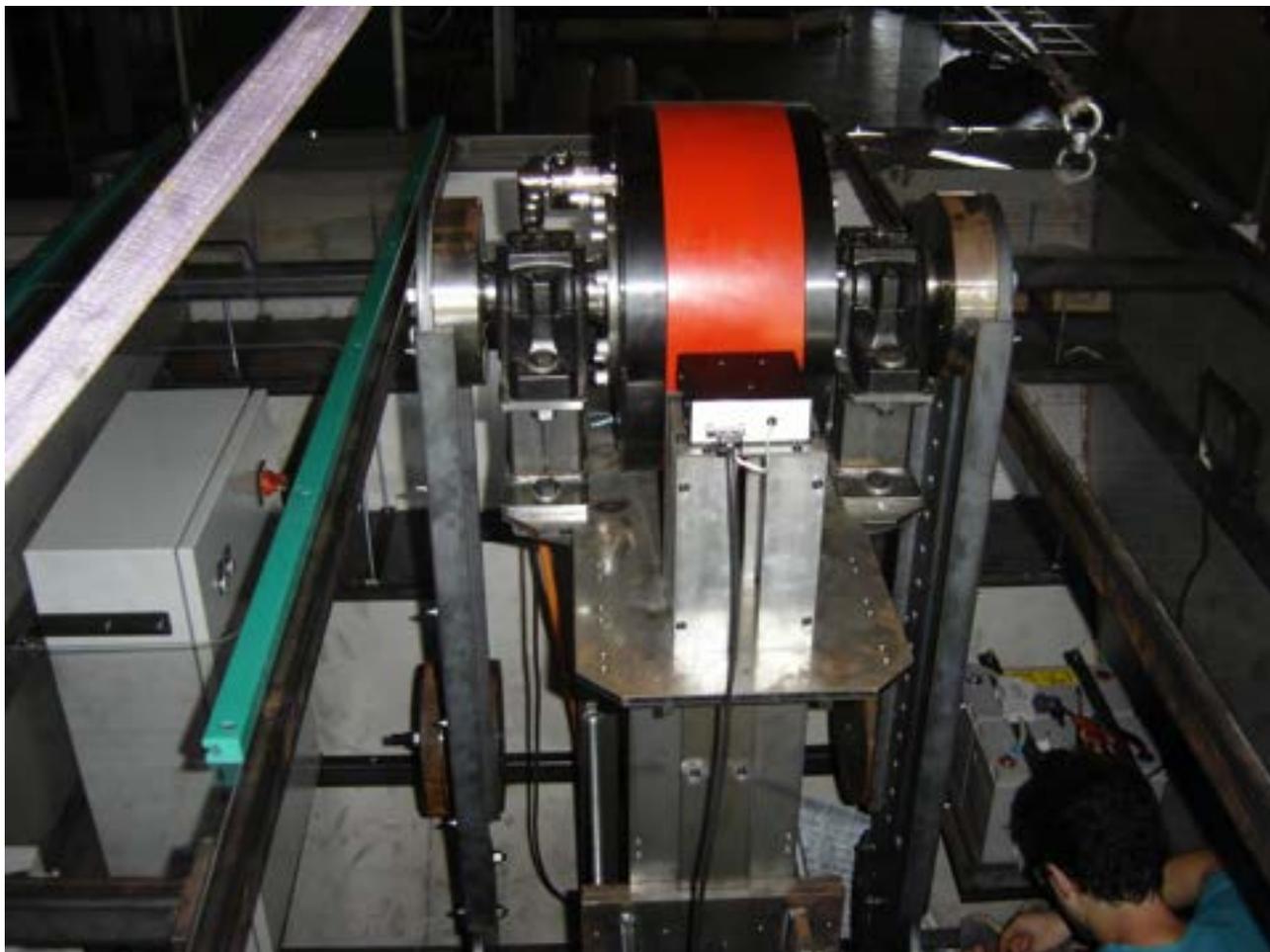


Figura 2 – vista interna del prototipo

## 2.2 Svolgimento delle prove

La vasca navale di esecuzione delle prove è il bacino rettilineo n° 2 disponibile presso l'Istituto INSEAN sito in Via di Vallerano 139, 00128 Roma.



Figura 3 – bacini Rettilinei presso INSEAN (n°2 a sinistra, n° 1 a destra)

Quantità	Valore
Lunghezza	220 m
Larghezza	9 m
Profondità	3.5 m
<b>Onda regolare</b>	
Lunghezza d'onda	1 – 10 m
Periodo	0.8 – 2.53 s
Altezza	0.1 – 0.45 m
Pendenza	1 – 9 °

Tabella 1 – Caratteristiche del bacino di prova n°2 INSEAN

Le prove consistono nel sottoporre il dispositivo, disposto nella configurazione n. 1, a onde regolari con altezza 0.05 m e periodo da 1 a 1.5 s, per circa 120 secondi.

Per impedire il trascinarsi dello scafo lungo il bacino da parte delle onde incidenti, viene installato un sistema di ormeggio ancorato al fondo del canale.

### 2.2.1 Il setup sperimentale

Il prototipo è stato posizionato nel bacino INSEAN, ormeggiato al fondo del canale ed è stato connesso ai sistemi di acquisizione e controllo.



Figura 4 – Varo del prototipo nel bacino

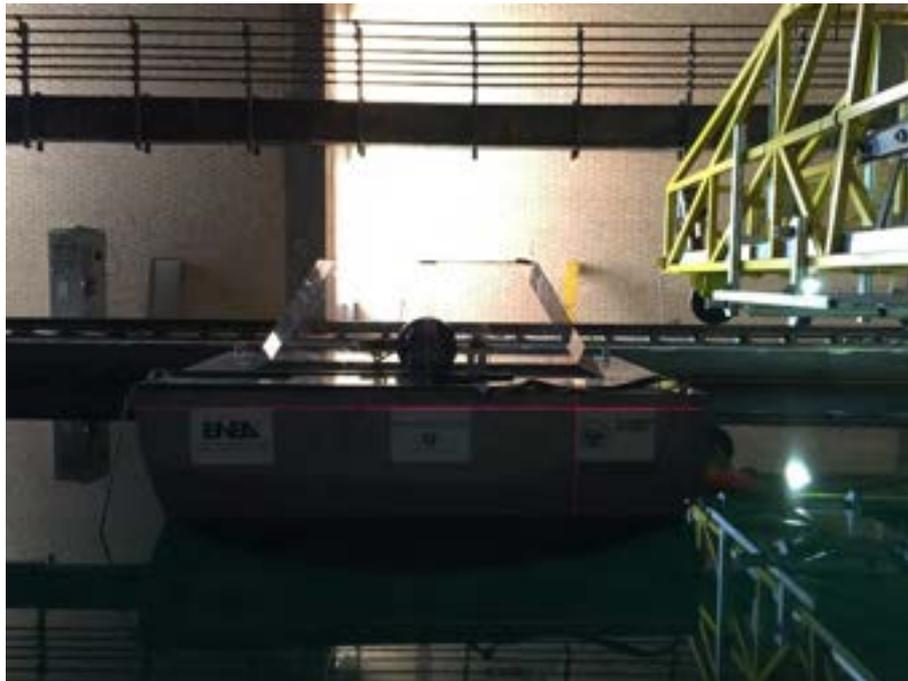


Figura 5 – Il prototipo in assetto di prova (vista laterale) con la copertura originale



Figura 6 – Il prototipo in assetto di prova con copertura modificata per permettere oscillazioni del pendolo maggiori



Figura 7 – Il banco di controllo e acquisizione

### 2.2.2 Il sistema di ormeggio

Il sistema di ormeggio deve mantenere in posizione il prototipo senza alterarne la dinamica di funzionamento a causa delle forze trasmesse. Si è quindi optato per il sistema rappresentato in Figura 12, nel quale la catena di ormeggio ha un estremo vincolato a una massa appoggiata sul fondo del bacino, è collegata al galleggiante (jumper) e quindi raggiunge lo scafo. La presenza del galleggiante e il lungo tratto di catena che lo congiunge allo scafo fanno sì che il sistema di ormeggio mostri un comportamento elastico non lineare. Tale sistema non influisce sulla dinamica del moto di beccheggio dello scafo e al contempo lo trattiene in prossimità della posizione prescelta.

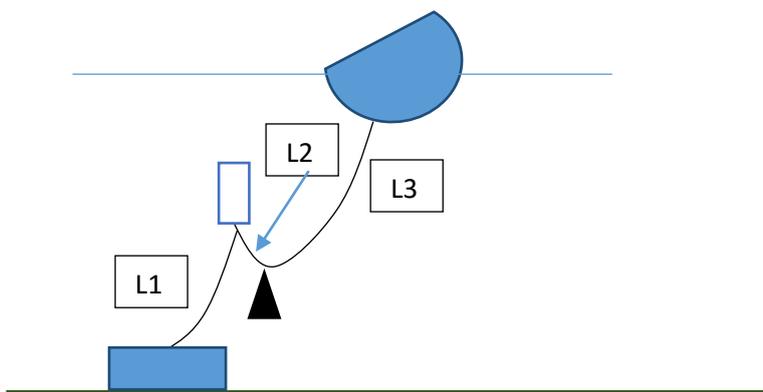


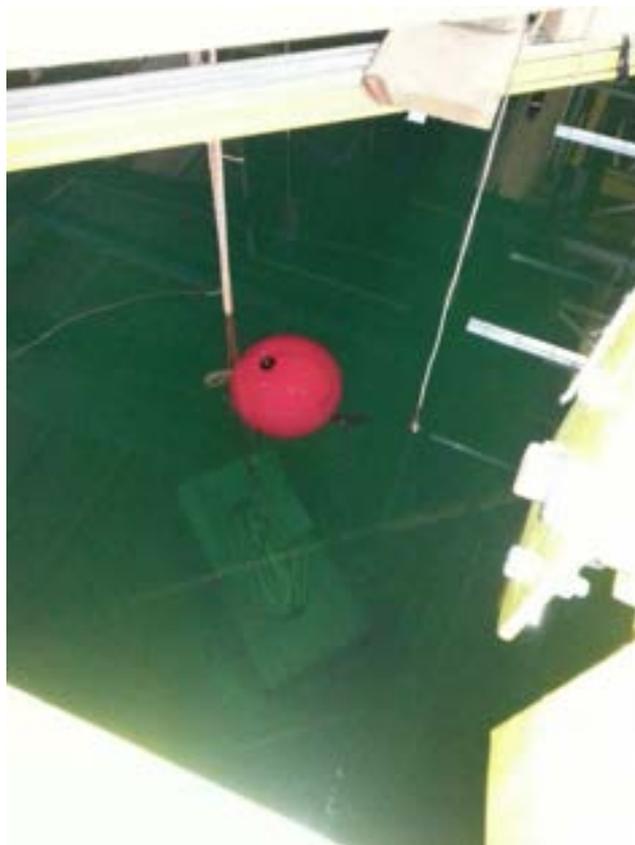
Figura 8 – Il Layout dell'ormeggio.

L1	2 m
L2	0.4 m
L3	2 m
Spinta positiva Jumper	250 N
Massa	10 kg
Altezza corpo morto	0.5 m
Profondità dell'acqua	3.2 m

**Tabella 2 – Valori dei parametri di ormeggio.**



**Figura 9 – configurazione dell'ormeggio a secco**



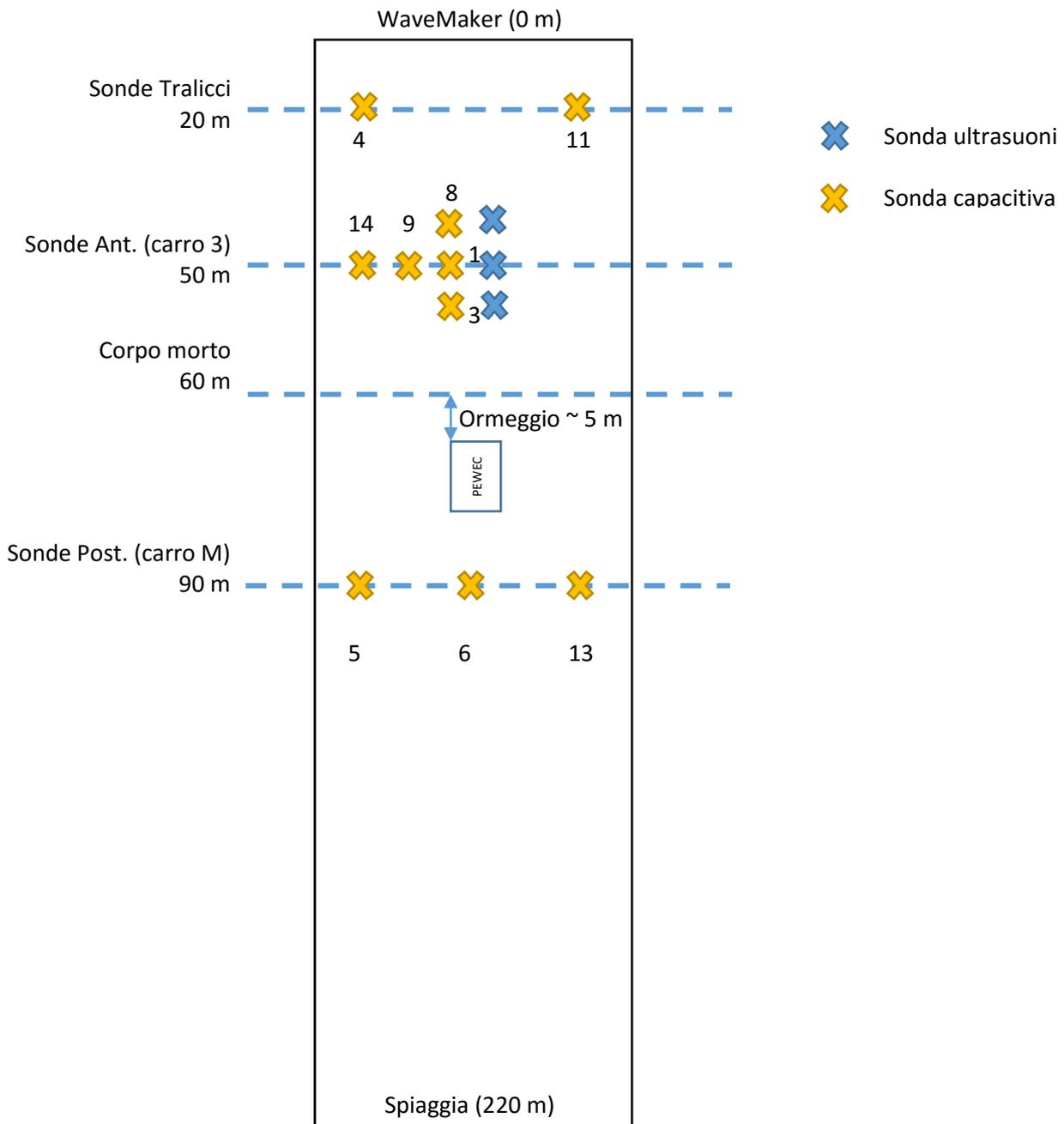
**Figura 10 – Installazione del sistema di ormeggio (operazione di sollevamento e vincolo al corpo morto posto in fondo al bacino)**



Figura 11 –Sistema PEWEC ormeggiato

### 2.2.3 Misura del profilo dell'onda

Il profilo d'onda è misurato attraverso n° 10 sonde capacitive e n° 4 sonde a ultrasuoni poste come da layout mostrato in figura 14. Le sonde capacitive e a ultrasuoni sono acquisite con due sistemi di acquisizione diversi sincronizzati attraverso il segnale di trigger TTL fornito a inizio prova dal controllore di bordo del PEWEC.



Legenda:

Carro 3:           carro di colore giallo e non motorizzato

Carro M:           carro motorizzato

Figura 12 – Layout configurazione delle sonde.



Figura 13 – Testa di misura della sonda capacitiva

**Caratteristiche della sonda dichiarate:**

Tensione di alimentazione:	5V	(da 4,5V a 18V)
Sensibilità (con $R_a=1.2K\Omega$ $R_b=12K\Omega$ ):	s/pF	(da a )
Sensibilità:	s/mm	
Risoluzione teorica:	$\infty$	
Risoluzione del sistema:	Max: conteggi/mm (sonda emersa)	
	Min: conteggi/mm (sonda immersa)	
Risoluzione fisica	Uguale al menisco $\approx \pm 0.5$ mm	
Segnale di uscita:	onda quadra a 5V duty cycle $\approx 50\%$	
Range in frequenza oscillatore:	da 150 KHz ad 1 MHz (1.8MHz a vuoto)	
Frequenza di acquisizione :	50 Hz	
Accuratezza sperimentale	1-2 mm	

Figura 14 – Caratteristiche della sonda capacitiva

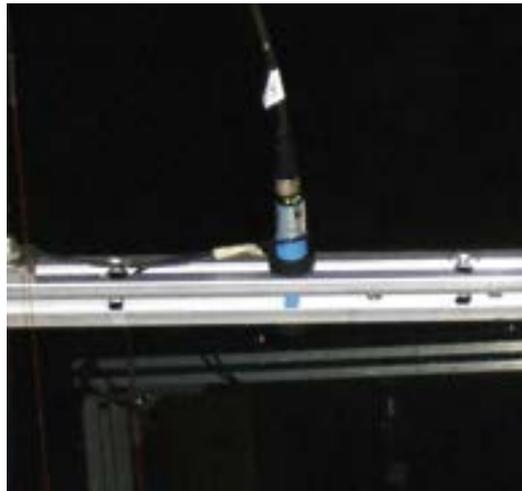


Figura 15 – Le sonde a ultrasuoni per la misura del profilo d’onda

Technical Data	Technische Daten	Données techniques	
Max. sensing distance	Max. Reichweite	Portée	500 mm
Min. sensing distance	Min. Reichweite	Distance minimale	60 mm
Response time 90% of final value	Ausprechzeit auf 90% des Endwertes	Temps de réponse à 90% de la valeur finale	100 ms
Beam angle	Schallkeule	Angle de faisceau	8°
Linearity error	Linearitätsfehler	Erreur de linéarité	<0,3 %
Repeatability of measured distance	Wiederholgenauigkeit des Meßabstandes	Répétabilité	±0,2 % ±1 mm
Temperature range	Temperaturbereich	Température de service	-15 ... +70 °C
Temperature compensation	Temperaturkompensation	Compensation température	Yes/Ja/Oui
Operating voltage	Betriebsspannung	Tension de service	15... 30 Vdc
Possible min. supply	Mögliche min. Versorgung	Min. alimentation possible	12 Vdc
Current consumption	Stromaufnahme	Courant consommé	<40 mA
Output	Ausgang	Sortie	4 ... 20mA
Sensitivity	Steilheit	Sensibilité	Teach In
Teach In	Teach In	Apprentissage	
P1 / P2 determines output position	Der Bereich wird durch P1 und P2 festgelegt	La gamme est défini par les positions P1 et P2.	
Plastic housing	Kunststoffgehäuse	Boîtier plastique	M18x1
Sealing	Schutzart	Étanchéité	IP67
Attention !!! Do not expose sensor head to hot water > 50° C or water steam!!	Achtung !!! Den Sensorkopf nicht heißem Wasser >50°C oder Wasserdampf aussetzen!!	Attention !!! Ne pas mettre en contact continu la tête du capteur avec de l'eau avec une température supérieur à 50 °C ou avec de la vapeur d'eau	
Cable connection	Kabelanschluss	Connexion câble	2 m

Tabella 3 – Caratteristiche del sensore FAE FA 18-500

Le sonde forniscono un’uscita analogica in corrente 4-20 mA che viene convertita in tensione 2-10 V tramite l’inserimento in serie di una resistenza calibrata del valore di 500 Ohm.

La calibrazione del sistema è mostrata in figura 18.

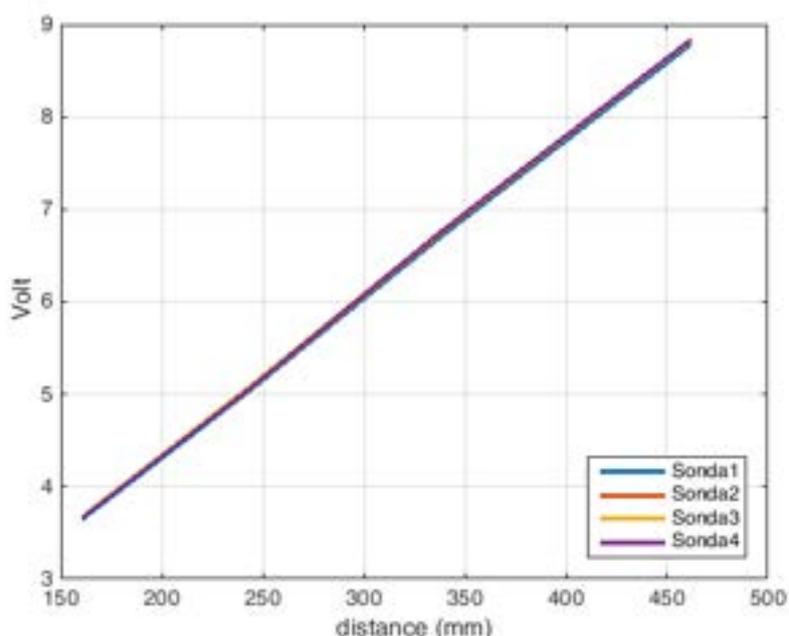


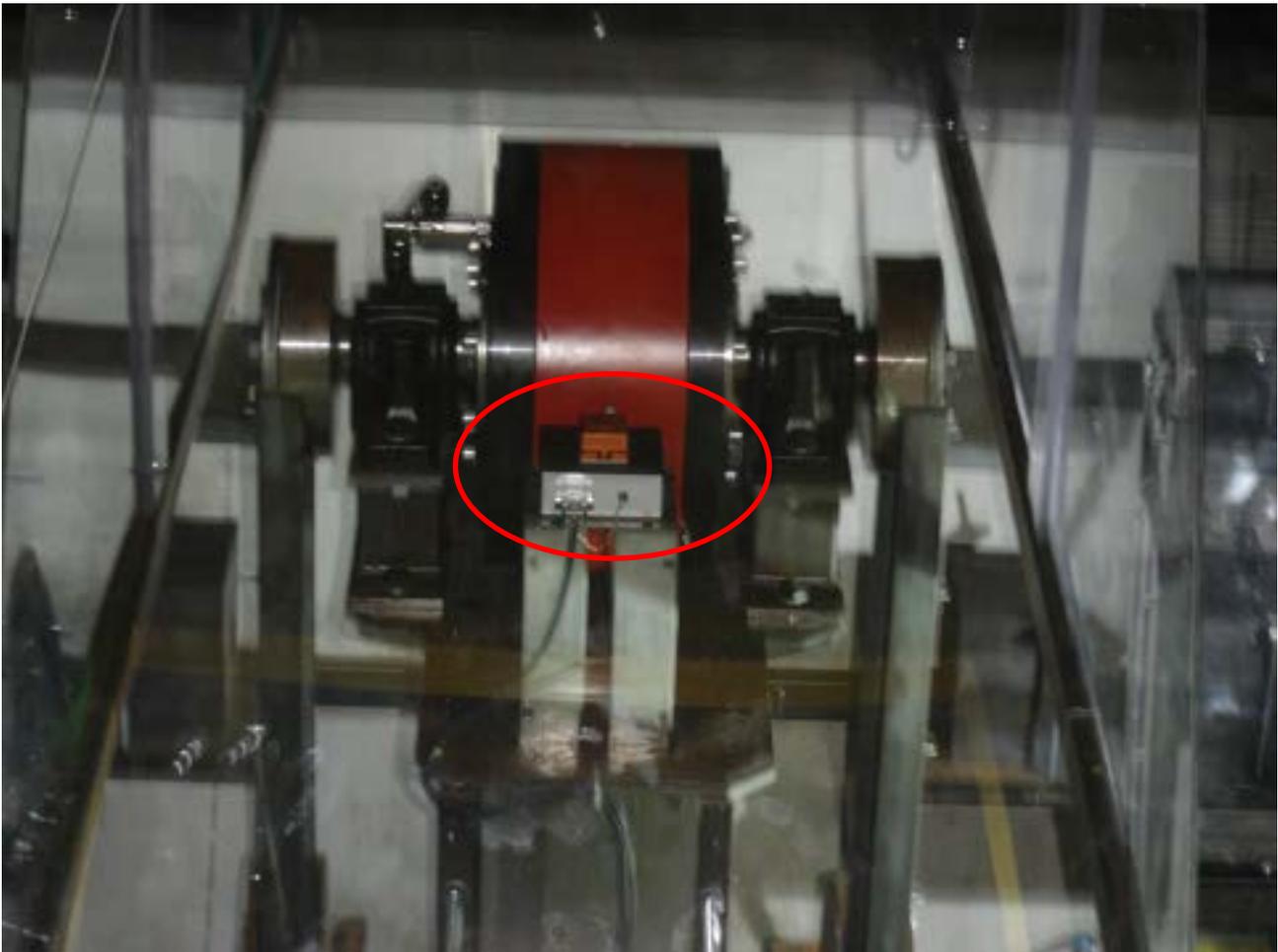
Figura 16 – Caratteristica di misura delle sonde a ultrasuoni.

#### 2.2.4 Misura dell'angolo $\delta$ di beccheggio dello scafo

L'angolo  $\delta$  di beccheggio dello scafo è misurato con il sensore inerziale MTi prodotto da Xsens. Tale sensore grazie ad accelerometri e giroscopi è in grado di misurare posizione e velocità nello spazio del corpo al quale è vincolato. Le caratteristiche del sensore sono mostrate in Tabella 4.

Tabella 4 – Caratteristiche del sensore MTi

Modello	MTi 30
Risoluzione angolare	0.05°
Ripetibilità	0.2°
Peso	50 g
Dimensioni	58 x 58 x 22 mm



**Figura 17 – Posizionamento del sensore MTi all'interno dello scafo**

### 2.2.5 Misura di angolo, velocità e coppia agenti sul PTO

L'angolo e la velocità di oscillazione del pendolo relativi allo scafo sono misurati attraverso il trasduttore encoder sin/cos integrato nel PTO. Il momento torcente agente sul PTO  $T_e$  può essere stimato tramite la corrente che circola nel PTO, sebbene tale misura indiretta possa essere soggetta a errore (variabilità durante il funzionamento della costante di coppia).

Si è quindi optato per un sistema di misura diretta della coppia composto da una sospensione dello statore del PTO abbinata a un braccio con cella di carico collegata al telaio. In questo modo nota la distanza fra l'asse della cella di carico e l'asse di rotazione del pendolo è possibile misurare la coppia di reazione scaricata dallo statore del PTO sullo scafo.

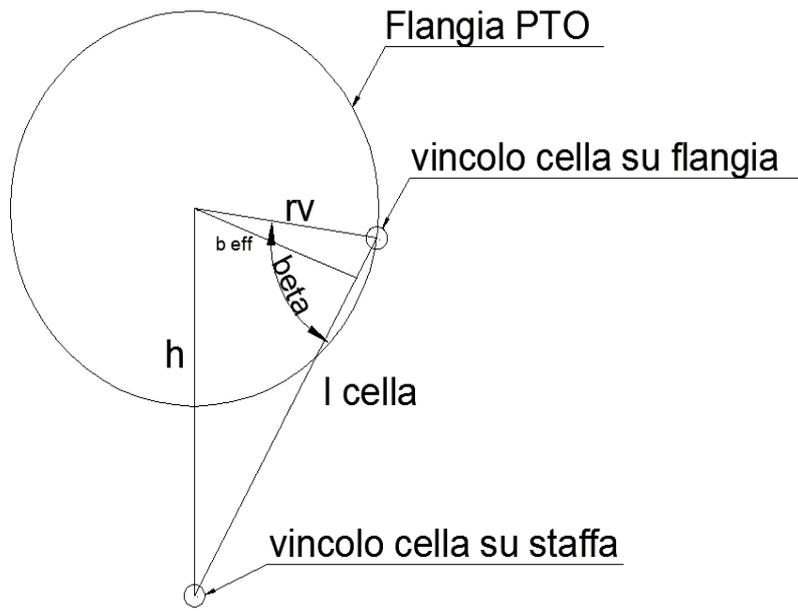
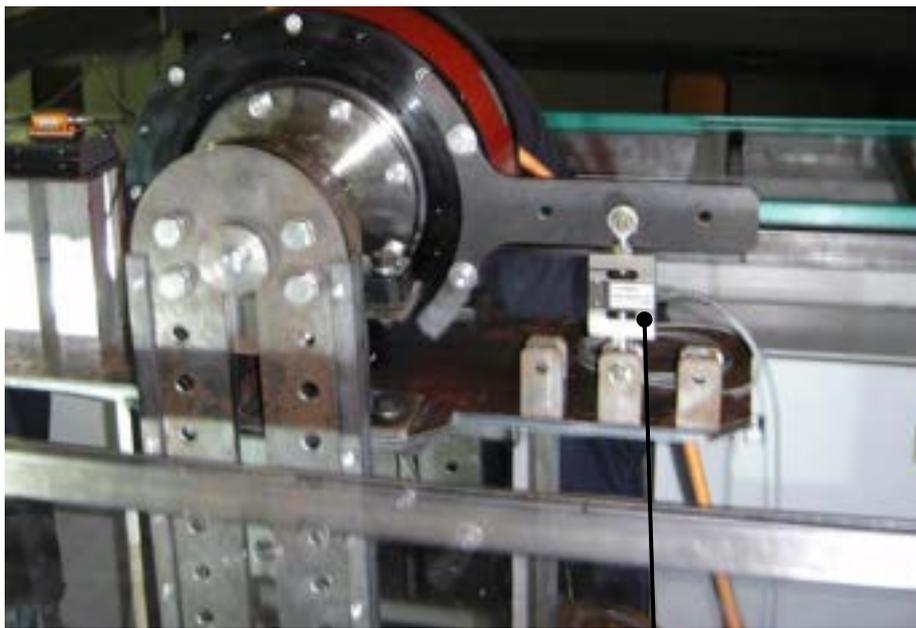


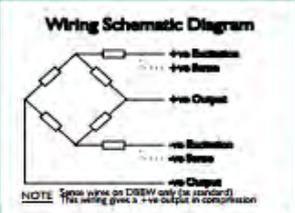
Figura 18 – Il layout di misura della coppia del PTO



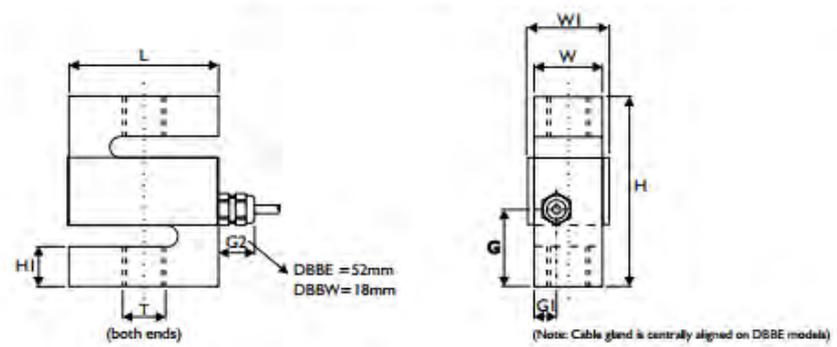
Cella di carico

Figura 19 – Foto del layout di misura della coppia del PTO

# SPECIFICATION



CHARACTERISTICS	DBBE	DBBW	UNITS
Rated Capacity:	50, 100, 150, 200, 300, 500	500, 1000, 2000, 5000	kg
Rated Output:	2.0 ± 10%	2.0 ± 0.1%	mV/V
Total Error:	<0.03	<0.030	±% of Rated Output
Zero Return after 30 mins:	<0.03	<0.025	±% of Applied Load
Zero Balance:	<5	<2	±% of Rated Output
Temperature Range: Operating	-30 to +70	-30 to +80	°C
Compensated	-10 to +45	-10 to +40	°C
Temperature Effect: On Output	<0.003	<0.0015	±% of Applied Load/ °C
On Zero	<0.01	<0.003	±% of Rated Load/ °C
Safe Overload:	150	150	% of Rated Capacity
Ultimate Overload:	300	300	% of Rated Capacity
Excitation: Recommended	10	10	Volts AC or DC
Maximum	15	15	Volts AC or DC
Input Impedance:	415 ± 20	400 ± 20	Ohms
Output Impedance:	350 ± 3	350 ± 3	Ohms
Insulation Impedance:	>2000	>1000	Megohms
Deflection at Rated Capacity:	<0.4	<0.4	mm
Weight:	0.58	0.9 (1.9 for 5000kg)	kg
Construction:	Nickel Plated Alloy Steel	Stainless Steel	
Environmental Protection:	IP67	IP68	
Cables:	3 Metre 6 Core Screened	5 Metre 6 Core Screened	



**All dimensions in mm**

MODEL	CAPACITY (kgf)	H	L	W	WI	HI	G	GI	Threads T
DBBE	50 - 500	80	62.1	18	22	15	40	9	M12 x 1.75
DBBW	500	90	70	32	32	19	36.6	10.4	M12 x 1.75
DBBW	1000	90	70	32	32	19	36.6	10.4	M16 x 2.0
DBBW	2000	90	70	32	32	19	36.6	10.4	M16 x 2.0
DBBW	5000	120	100	45	45	26	60	13.8	M24 x 2.0

Figura 20 – caratteristiche delle celle di carico DBBE 200 Kgf e DBBW 500 kgf

Di seguito si riporta la caratteristica di calibrazione del sistema di misura della coppia.

Tabella 5 – Calibrazione del sistema di misura di T<sub>c</sub>.

Massa (kg)	Forza (N)	Tensione(V)
108	344.331	2.5

97.2	309.8979	2.23
86.4	275.4648	1.96
75.6	241.0317	1.69
64.8	206.5986	1.42
54	172.1655	1.15
43.2	137.7324	0.88
32.4	103.2993	0.61
21.6	68.8662	0.34
10.8	34.4331	0.07
0	0	-0.21

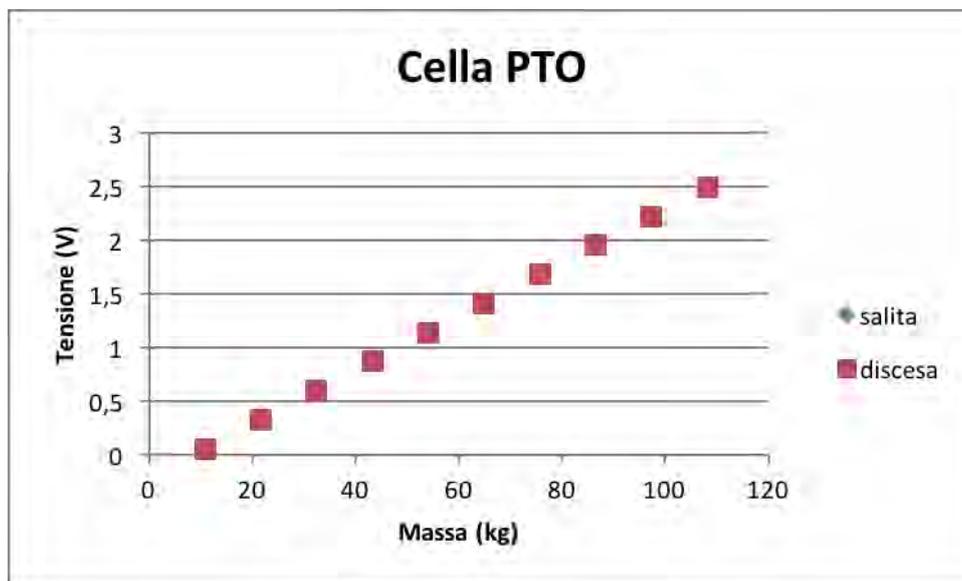


Figura 21 – Curva di calibrazione del sistema di misura della coppia

### 2.2.6 Il sistema di controllo del PTO

La legge di controllo del PTO è uno dei parametri che permettono di variare la coppia scambiata tra PTO e pendolo oscillante, variando così l'assorbimento di potenza da parte del sistema.

In queste prove il PTO è stato regolato in modo da comportarsi come un sistema molla smorzatore, con costante di elasticità  $k$  e coefficiente di smorzamento  $c$ .

$$T_e = k\varepsilon + c\dot{\varepsilon}$$

La legge di controllo è implementata tramite il sistema National Instruments CompactRio. Il cRio è un controllore con intelligenza a bordo e con moduli di I/O per interfacciarsi al sistema da controllare. Nel nostro caso il cRIO esegue le seguenti operazioni:

1. Lettura di posizione e velocità dal driver del PTO
2. Lettura del segnale analogico proveniente dalla cella di carico
3. Valutazione della legge di controllo e invio del valore di coppia desiderata al driver del PTO

Il driver di controllo del PTO è un servosistema di controllo coppia che a partire da un set fornito di coppia lo impone sull'asse del PTO. Tale driver fornisce in uscita le grandezze posizione e velocità del PTO e comunica con il cRIO tramite protocollo seriale.

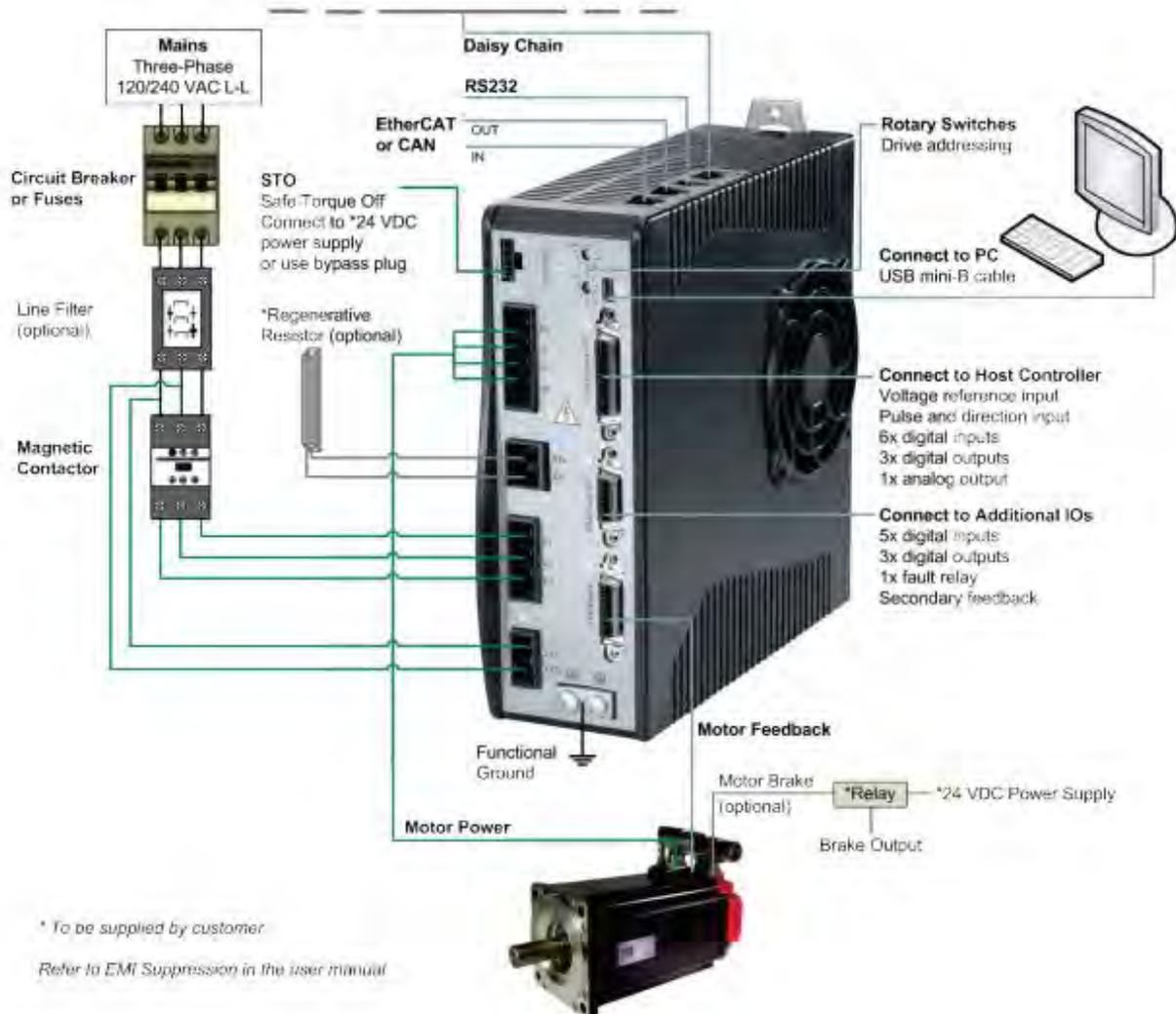


Figura 22 – Il driver del PTO



Figura 23 – Il sistema NI cRio

In modo da non perturbare la dinamica dello scafo e quindi indurre possibili errori di prova, il prototipo è stato progettato in modo da non necessitare l'uso di cavi esterni che inducendo azioni sullo scafo ne variano il comportamento idrodinamico.

I cavi rimossi sono quelli relativi all'alimentazione energetica del sistema, alla trasmissione dei segnali acquisiti e alla sincronizzazione delle grandezze di bordo con quelle di vasca (trigger):

1. Il prototipo è completamente autonomo dal punto di vista energetico e non necessita di connessioni esterne. La fonte di energia è composta da 4 batterie al gel a 12 V con capacità 110Ah ciascuna. Le batterie sono organizzate in due pacchi separati collegati in parallelo, ciascun pacco composto di due batterie collegate in serie per ottenere la tensione di 24 Vcc. Dalla tensione delle batterie viene generata la tensione monofase 230 Vac tramite un inverter ricaricabatterie. La tensione monofase a 230 Vac è usata per l'alimentazione del driver del PTO e poi viene riconvertita in tensioni di servizio stabilizzate (24 Vcc, 5 Vcc) per l'alimentazione del controllore e dei sensori.



Figura 24 – Le batterie di bordo



Figura 25 – Il quadro di potenza con l'inverter e gli alimentatori.

2. Lo scambio di dati avviene senza l'utilizzo di cavi, in quanto il controllore cRio che funge da hub per l'acquisizione e il controllo dialoga con il PC di bordo vasca tramite rete WiFi ad hoc. Tale rete permette la configurazione dei coefficienti smorzanti ed elastici del PTO, l'avvio delle prove e lo scambio dei dati a termine prova.



Figura 26 – Il router Wifi

3. La sincronizzazione delle grandezze di bordo con quelle della vasca avviene tramite un segnale di trigger wifi lanciato dal controllore cRio e recepito a bordo vasca come segnale digitale TTL dall'acquisitore INSEAN. In modo da evitare l'utilizzo di cavi per la trasmissione di questo segnale è stato modificato un sistema wireless di accoppiamento macchina fotografica / flash remoto di tipo professionale. Tale sistema permette l'invio a decine di metri di un segnale di trigger senza l'utilizzo di cavi.



Figura 27 – Il trigger WiFi

Il sistema di controllo e acquisizione implementato tramite il controllore cRio e anche i sistemi di acquisizione delle sonde sono lavorano con una frequenza di campionamento di 50 Hz.

#### 2.2.7 Metodologia di esecuzione delle prove

Le prove sono state svolte con la seguente procedura.

1. Avvio del sistema di acquisizione dell'onda tramite sonde capacitive
2. Avvio del sistema di acquisizione del profilo d'onda tramite sonde a ultrasuoni
3. Avvio del sistema di controllo cRio che fornisce il segnale di trigger per gli acquisitori d'onda
4. Avvio del battitore e generazione dell'onda
5. Tempo di prova di circa 120 s
6. Spegnimento del battitore
7. Spegnimento del sistema di controllo del PTO (CompactRio) e conseguente spegnimento automatico del sistema di acquisizione del profilo d'onda

8. Attesa di circa 30-45 minuti per la stabilizzazione del bacino di prova (tempo variabile a seconda del contenuto energetico dell'onda precedente)

### 2.3 Tipologia di prove eseguite

Sono state svolte le seguenti tipologie di prova:

1. Prove per la verifica della qualità dell'onda
2. Prove per l'identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato
3. Prove di risposta in frequenza con onda regolare con coefficiente di smorzamento pari a 40 Nms/rad
4. Prove con onda regolare a periodo  $T = 2 - 2.2 - 2.5$  s,  $c = 40-600$  Nms/rad
5. Prove in onda irregolare al variare della configurazione del sistema

Sono state eseguite un totale di 114 prove:

- 51 prove comprendenti verifica della qualità dell'onda, messa a punto dei sistemi di bordo e dei sistemi di acquisizione, risposta in frequenza a pendolo bloccato (RAO).
- 63 prove per lo studio del sistema PEWEC al variare delle condizioni ondose e della configurazione interna

Gli andamenti temporali delle 63 prove sul PEWEC sono riportati in Appendice 1.

**Tabella 6 – Configurazioni pendolo**

	C1	C2
Caratteristiche	Configurazione nominale, risonante a 2.2 s	Configurazione per onde lunghe, risonante a 2.5 s
Massa Pendolo	400 kg	400 kg
Lunghezza del pendolo	0.889 m	0.889 m
Disposizione zavorre	Ripiani alti: 0 kg Ripiani bassi: 640 kg Fondo scafo: 180 kg	Ripiani alti: 640 kg Ripiani bassi: 0 kg Fondo scafo: 180 kg
Massa totale	3176 kg	3176 kg
Altezza colonna	0.26	0.36

### 2.4 Prove per la verifica della qualità dell'onda

Le prove sono state eseguite mantenendo costante l'altezza dell'onda generata; ne è stato variato il periodo, al fine di valutare le prestazioni del sistema per diverse frequenze di onda regolare incidente.

I parametri di prova sono riportati in Tabella 5, mentre i parametri di configurazione del prototipo sono riportati in Tabella 6.

**Tabella 7 – Onde di prova**

			Teorici			Rilevati a vuoto			Errore		
Onda	Tipo	A vuoto	H/Hm0 (m)	T/Te (s)	Pd (W/m)	H/Hm0 (m)	T/Te (s)	Pd (W/m)	H/Hm0 (%)	T/Te (%)	Pd (%)
A	reg	Si	0.15	1.9	42.75						
B	reg	Si	0.15	2	45	0.147	2.000	43.3	-1.9%	0.0%	-3.8%
C	reg	Si	0.15	2.1	47.25						
D	reg	Si	0.15	2.2	49.5	0.150	2.200	49.6	0.1%	0.0%	0.2%
E	reg	Si	0.15	2.3	51.75	0.14981	2.2989	51.6	-0.1%	0.0%	-0.3%
F	reg	Si	0.15	2.4	54	0.152	2.398	55.5	1.5%	-0.1%	2.9%
G	reg	Si	0.15	2.5	56.25	0.14804	2.5003	37.2	-1.6%	0.0%	-3.8%
P	reg	Si	0.15	2.6	58.5	0.1423	2.5974	40.1	-1.2%	-0.1%	-1.5%
Q	reg	Si	0.15	2.7	60.75	0.15112	2.6997	61.6	0.7%	0.0%	1.5%
O	reg	Si	0.15	2.8	63	0.15565	2.8016	67.9	3.8%	0.1%	7.7%
U	irr	Si	0.221	2.23	54.4577	0.226	2.116	54.3	2.5%	-5.1%	-0.4%
U4	irr	Si	0.221	2.23	54.4577	0.21764	2.2436	53.1	-1.5%	0.6%	-2.4%

## 2.5 Risultati delle prove

Ogni prova acquisita durante i test è stata analizzata per valutare le performances del sistema.

Si possono così vedere gli andamenti di:

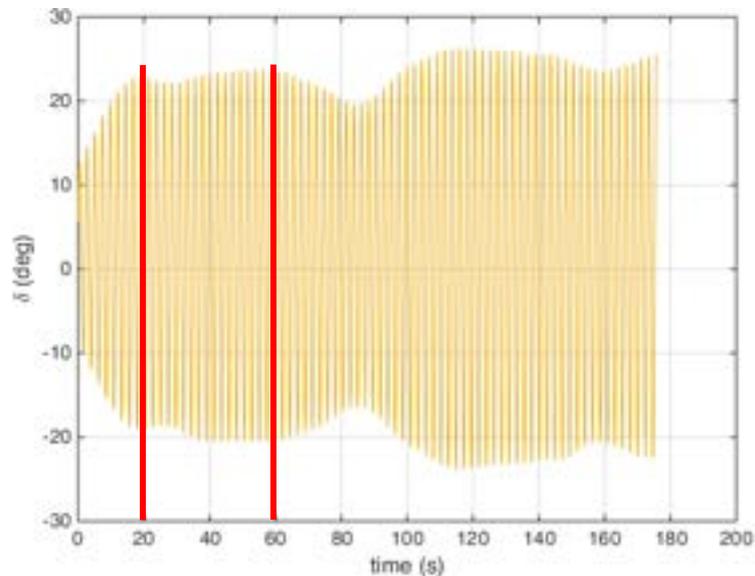
- $\varepsilon(t)$  = rotazione relativa pendolo-scafo
- $\dot{\varepsilon}(t)$  = velocità angolare relativa pendolo-scafo
- $T_{PTO}$  = coppia agente sull’asse del generatore
- $P_{PTO}$  = potenza assorbita dal generatore
- $\delta(t)$  = angolo di beccheggio scafo
- Roll = angolo di rollio dello scafo
- $\eta$  = elevazione dell’onda in ingresso

### 2.5.1 Prove per l’identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato

La prime serie di prove eseguite a pendolo bloccato hanno permesso di identificare il RAO nel range di frequenza o, nel nostro caso, di periodi di interesse.

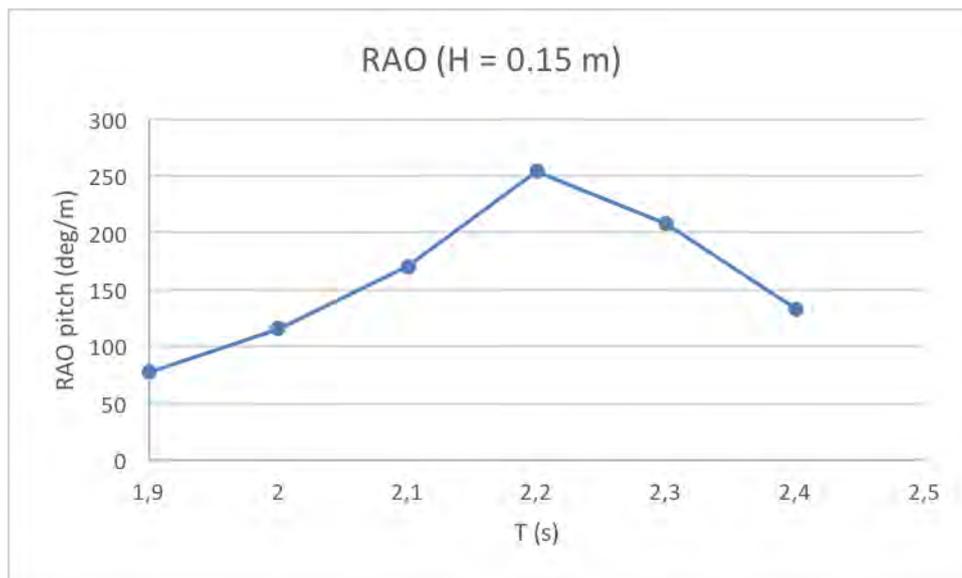
La Figura 28 mostra l’andamento tipico dell’angolo di beccheggio di una prova a pendolo bloccato per periodo 2.3 s, in cui, tralasciando il transitorio di arrivo delle onde, vi è una salita dell’angolo, uno stabilizzarsi (fra circa 20 e 60 s e poi una variazione dovuta all’arrivo dell’onda riflessa. Ogni periodo d’onda

ha il suo andamento caratteristico in funzione della sua velocità di propagazione e dell'interazione con il sistema e quindi ogni onda va elaborata singolarmente.



**Figura 28 – Andamento temporale dell'angolo di beccheggio ed intervallo in cui è eseguita la media.**

La stessa analisi è fatta per l'andamento nel tempo dell'elevazione dell'onda e, tramite il rapporto delle densità spettrali di potenza per le frequenze d'interesse è possibile determinare il RAO (Response Amplitude Operator) dello scafo, mostrato in Figura 29. Si nota come lo scafo presenti un picco della risposta per 1.3s, periodo per il quale si svolgerà gran parte delle prove. Il RAO è stato valutato usando le 4 sonde a ultrasuoni dando risultati comparabili.



**Figura 29 – RAO del prototipo con pendolo bloccato.**

## 2.5.2 Prove di risposta in frequenza con onda regolare con coefficiente di smorzamento pari a 40 Nms/rad

Le figure seguenti mostrano le prove a periodo variabile e smorzamento fisso pari a 40 Nms/rad. Tale operazione è usata per valutare preliminarmente la performance del sistema al variare del periodo dell'onda.

Si nota come il sistema sia in grado di raggiungere Relative Capture Width (RCW) fino al 60 %, con due picchi a 2 e 2.5 s e una valle a 2.2-2.3 s.

C1 Onda reg : H 0.15 m, plot al variare di T per  $c = 40$  Nms/rad

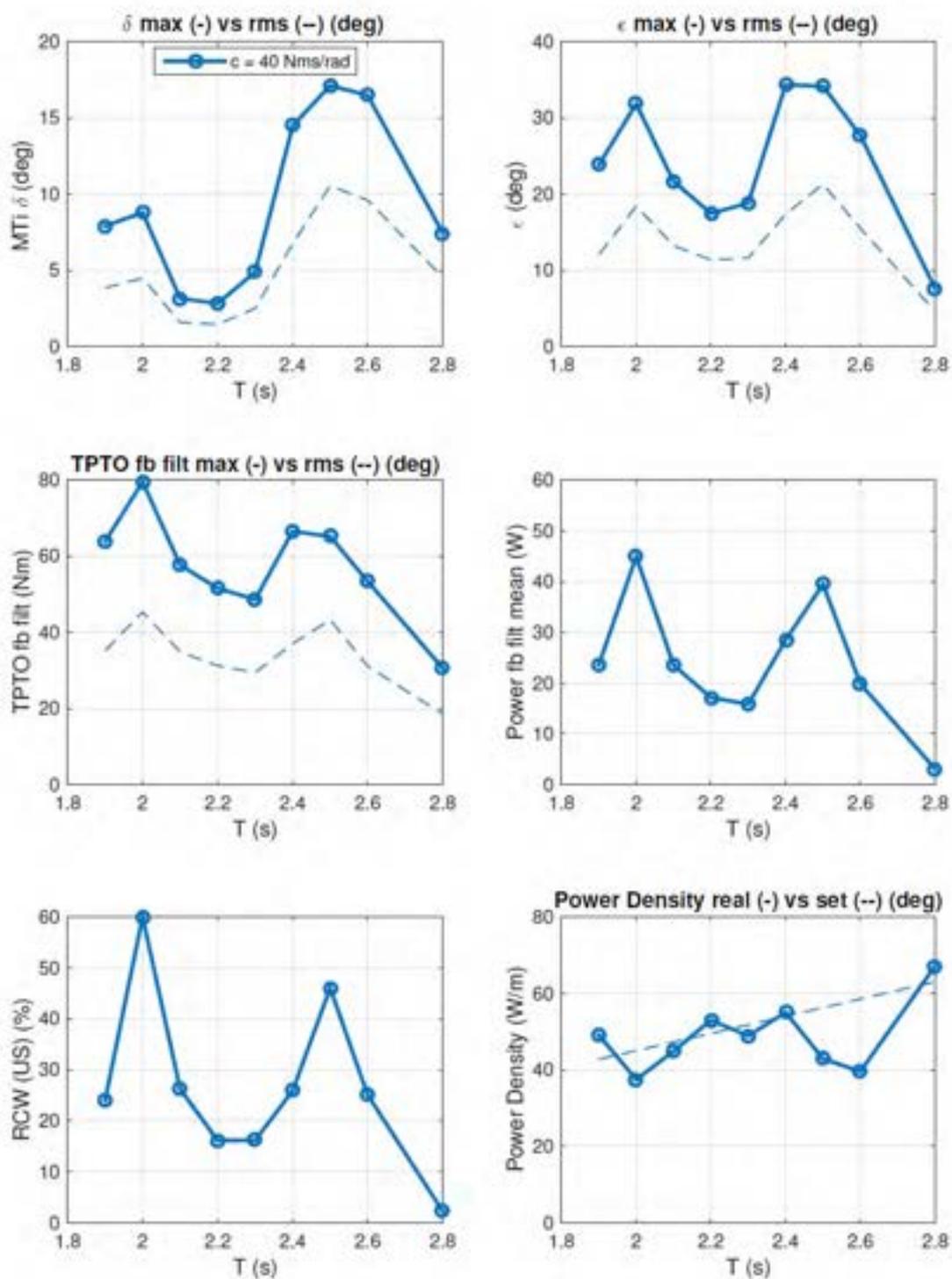


Figura 30 – risposta in frequenza per  $c = 40$  Nms/rad.

### 2.5.3 Prove con onda regolare a periodo $T = 2 - 2.2 - 2.5$ s, $c = 40-600$ Nms/rad

Le seguenti prove sono state eseguite al fine di investigare l'influenza del fattore di smorzamento in corrispondenza dei due picchi e della valle evidenziate in precedenza.

C1 Onda reg : H 0.15 m, plot al variare di T per diversi c

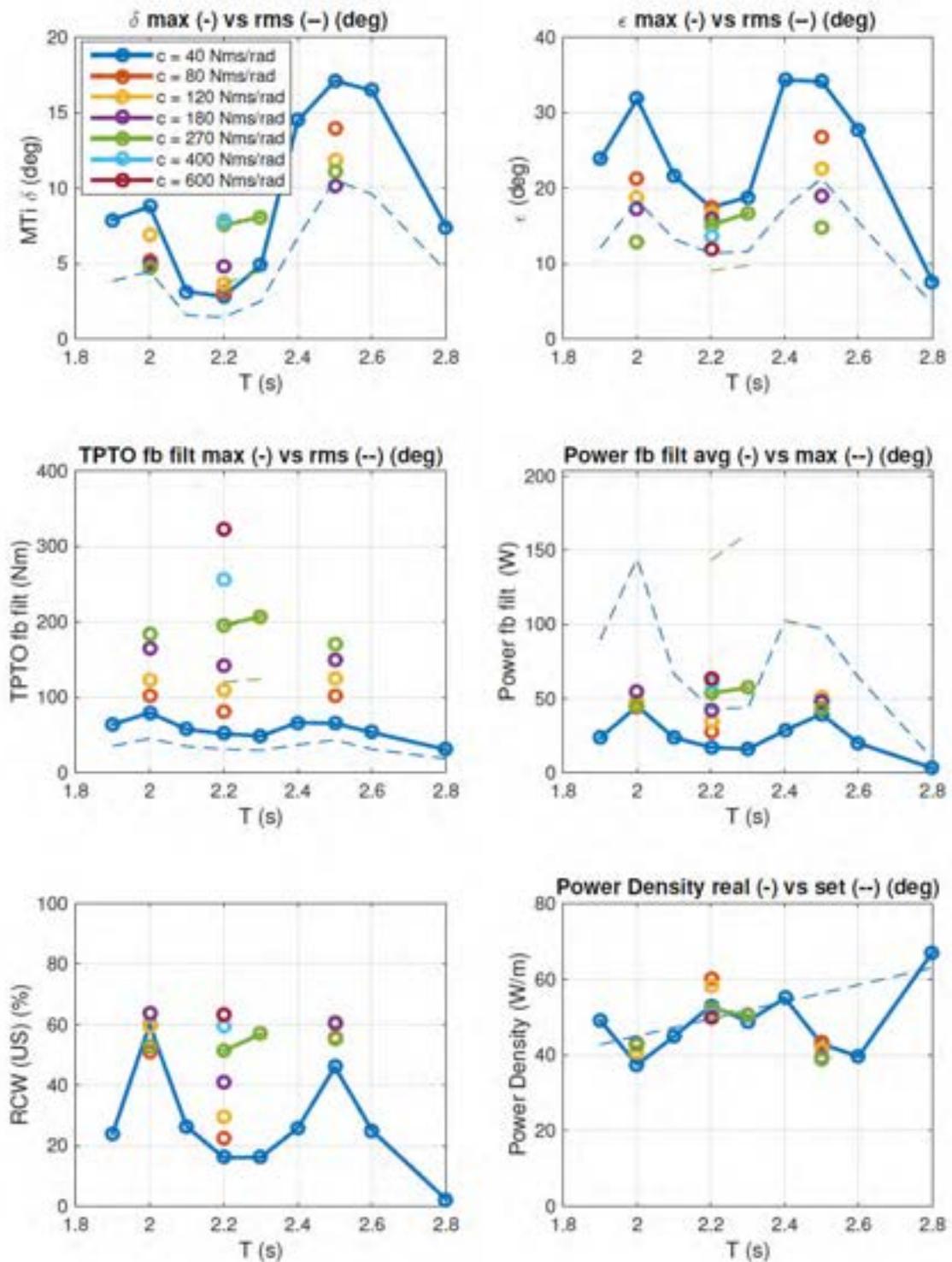


Figura 31 – risposta in frequenza per c variabile.

C1 Onda reg : H 0.15 m, plot al variare di c per T = 2, 2.2 e 2.5 s

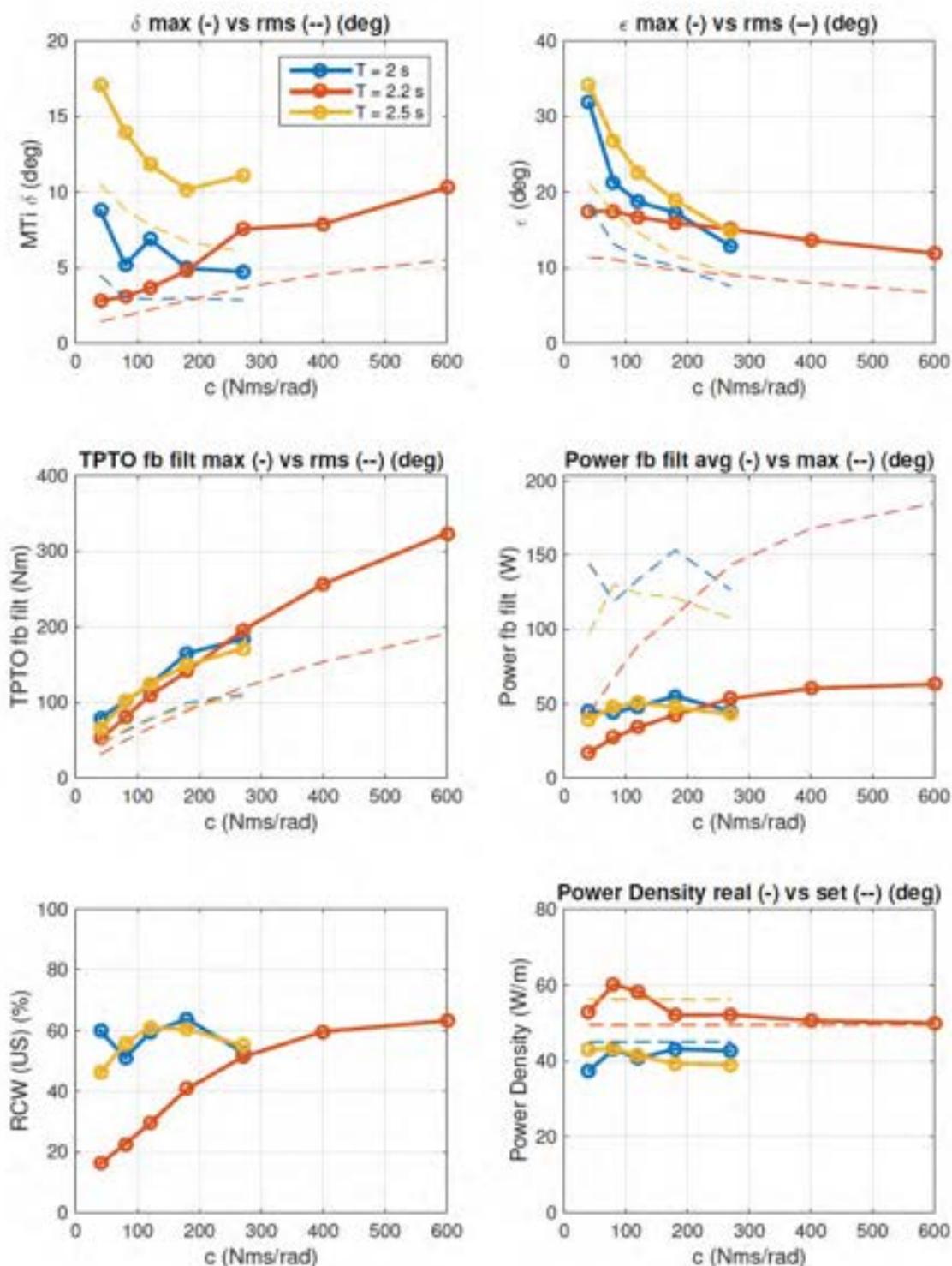


Figura 32 – risposta in frequenza per c variabile (T = 2 – 2.2 – 2.5 s).

Si nota che il fattore di smorzamento  $c$  influenza in maniera significativa la dinamica del sistema: in particolare, variando tale fattore è possibile raggiungere valori di RCW superiori al 60 % per periodi di onda compresi fra 2 e 2.5 s.

C1-C2 Onda irr : Onda nominale, plot al variare di c per onda U e U4

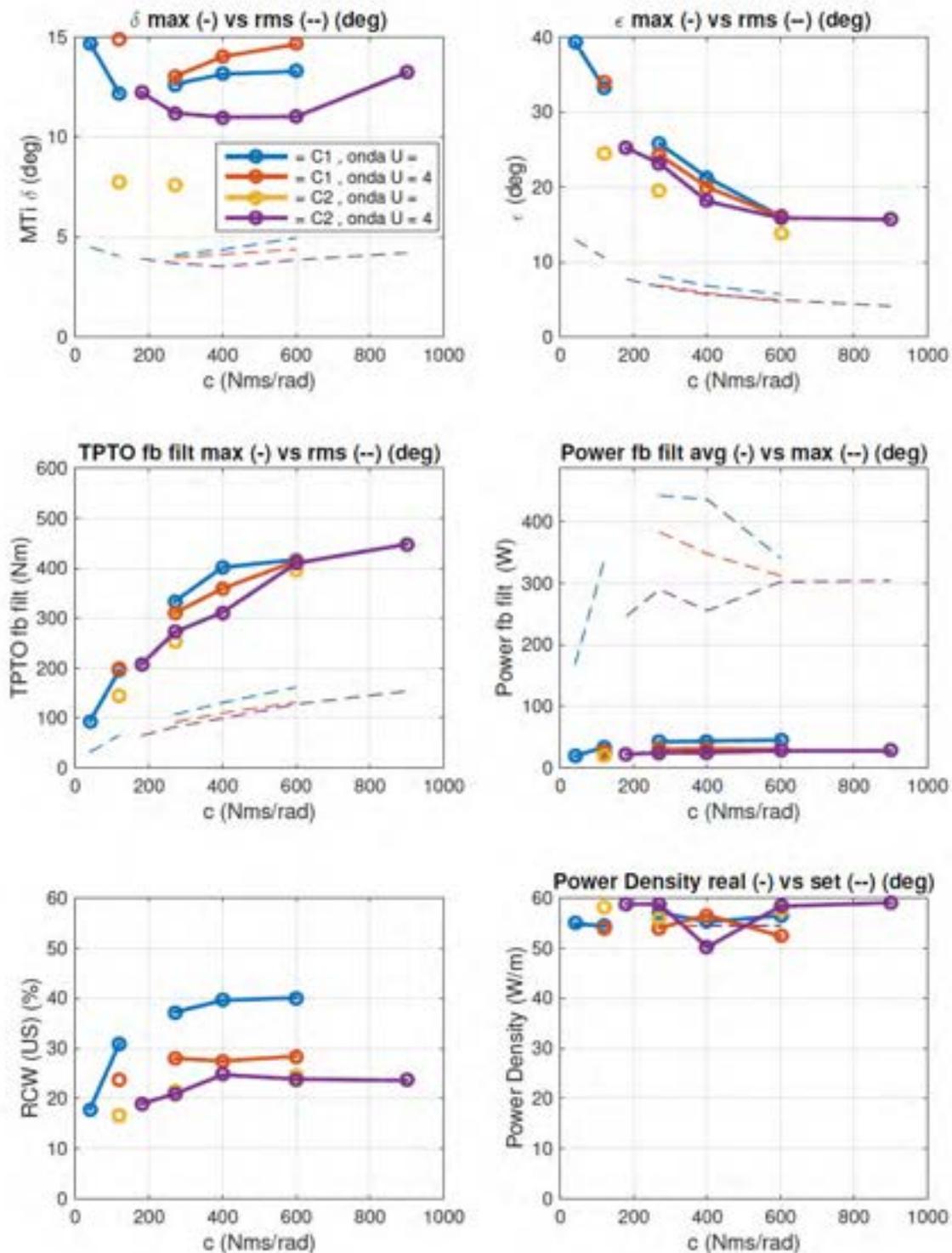


Figura 33 – Prove ad onda irregolare U e U4, configurazioni C1 e C2.

Si nota come il sistema PEWEC sia in grado di raggiungere parametri RCW in onda irregolare fino al 40 % per la configurazione nominale C1 attivata dall'onda reale di Pantelleria U. Si nota un abbassamento delle prestazioni fino a  $RCW = 28 \%$  per quanto riguarda la stessa configurazione ma in onda sintetica. La configurazione C2 presenta RCW massime pari al 25 % per ambedue le configurazioni ondose.

### 3 Conclusioni

Nel presente report è stata presentata l'attività di messa a punto del prototipo PEWEC in scala 1:12, necessaria per la verifica del funzionamento dei sistemi di bordo e di acquisizione del suddetto prototipo. Tale attività è stata eseguita dopo la realizzazione meccanica dei componenti del sistema.

Inoltre viene descritta la campagna sperimentale condotta presso il bacino di prova INSEAN. Una prima parte della campagna sperimentale ha permesso di verificare la qualità delle onde selezionate per i test e la risposta in frequenza a pendolo bloccato del prototipo PEWEC. La seconda parte della campagna di prova è stata progettata in modo da valutare il comportamento dinamico del sistema sia in onda regolare, sia in onda irregolare, nonché al variare dei parametri di controllo del PTO. Per quanto riguarda l'analisi in onda irregolare, è stata considerata un'onda misurata presso il sito di Pantelleria e scalata del fattore di scala 12 comparata con un'onda isoenergetica sintetica generata con armoniche a fase random.

Il sistema PEWEC ha mostrato efficienze di cattura superiori al 60 % nei test in onda regolare e pari al 40 % per test in onda irregolare.

## 4 Riferimenti bibliografici

[1] Nicola Pozzi, *Modeling and testing of a Wave Energy Converter*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Ottobre 2014

[2] Giovanni Rinaldi, *Approcci fisico-matematici per lo sviluppo di dispositivi inerziali per la produzione di energia dal moto ondoso*, Rapporto tecnico ENEA (in preparazione)

[3] Simone Drocco, *Analisi dinamica di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso con architettura a pendolo*, Tesi di Laurea Politecnico di Torino

[4] Giovanni Bracco et al., *A Pendulum based Wave Energy System*, atti del convegno "Energia dal mare – Le nuove tecnologie per i mari italiani", ENEA 1 e 2 luglio 2014

[http://www.enea.it/it/enea\\_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2](http://www.enea.it/it/enea_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2)

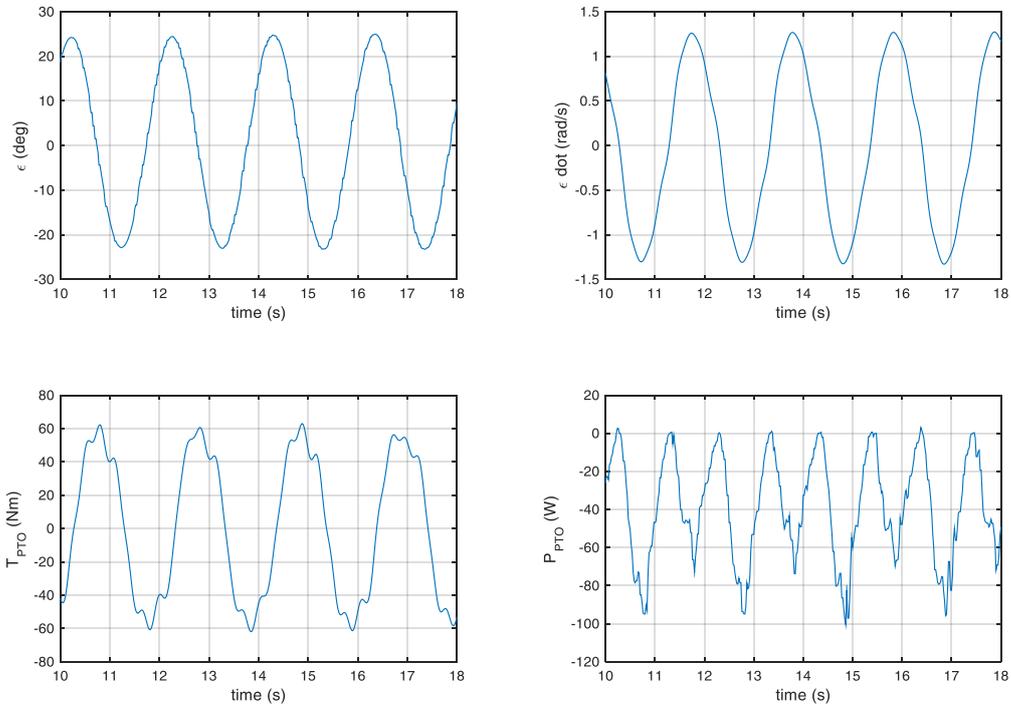
[5] Stefano Roveda, *EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PENDULUM BASED INERTIAL SEA WAVES CONVERTER* Bachelor Thesis, Politecnico di Torino, 2014.

[6] Payne, Gregory. "Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters." *The University of Edinburgh*, Vers. B 1 (2008).

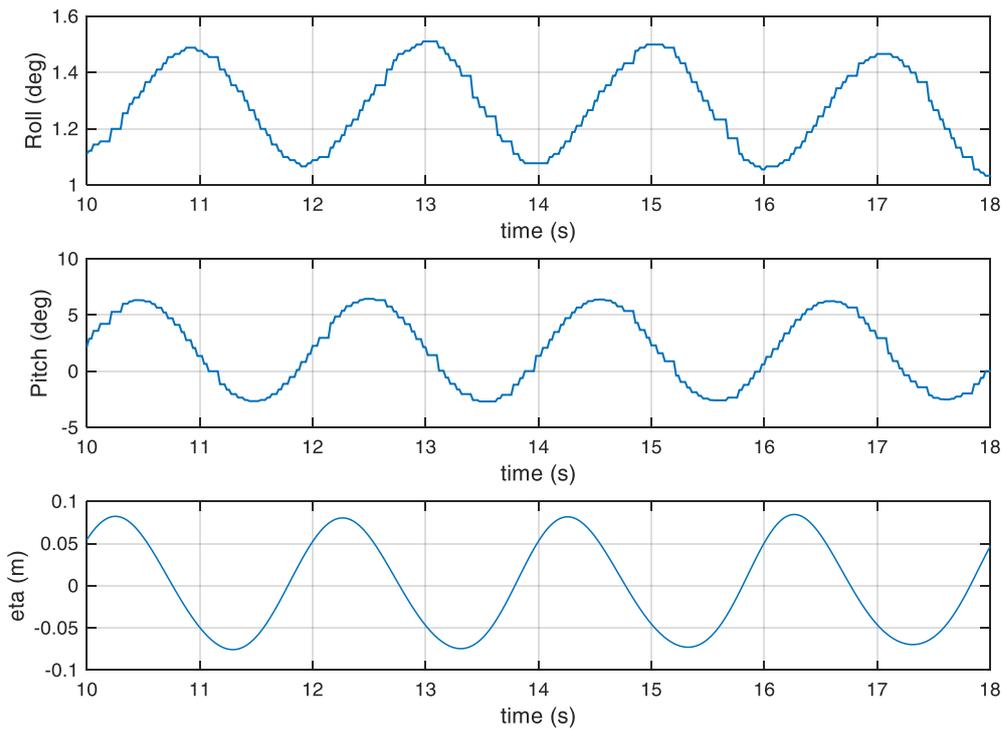


## 5 Appendice 1

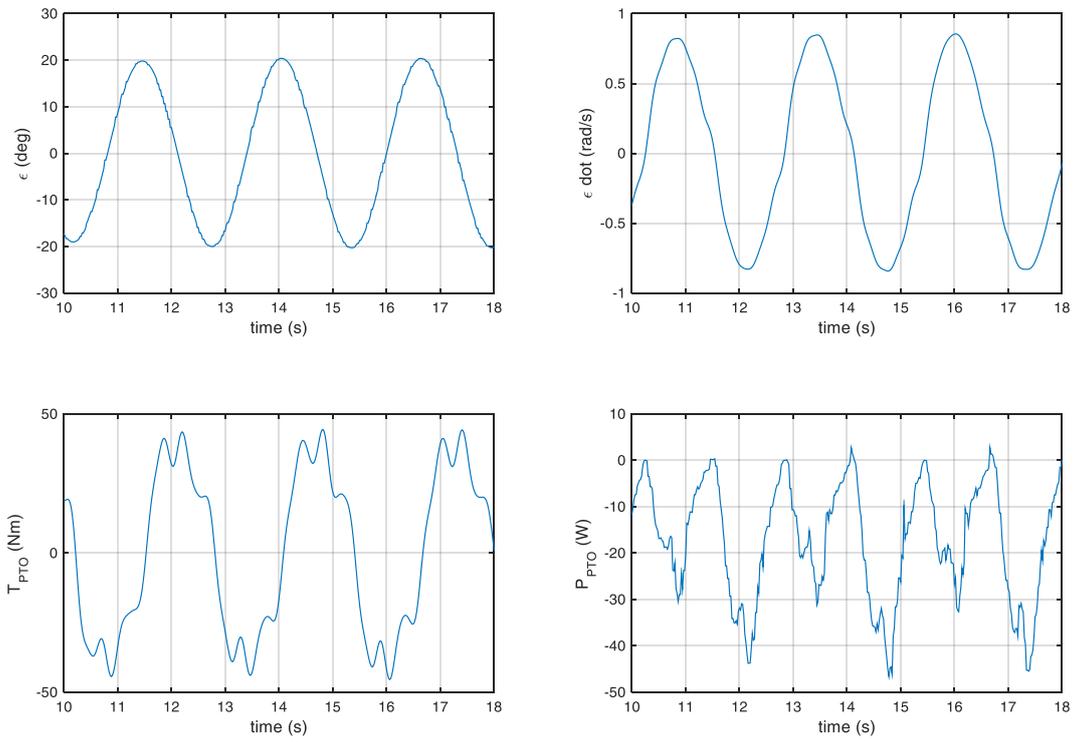
c052.mat



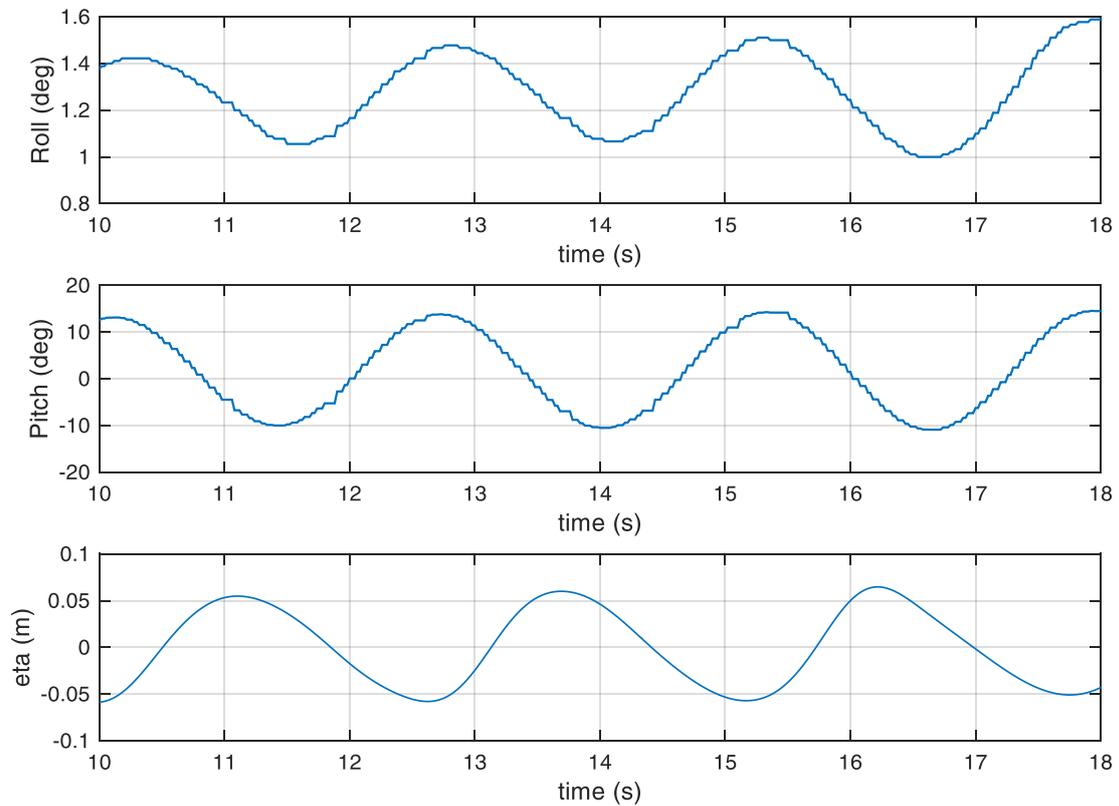
c052.mat



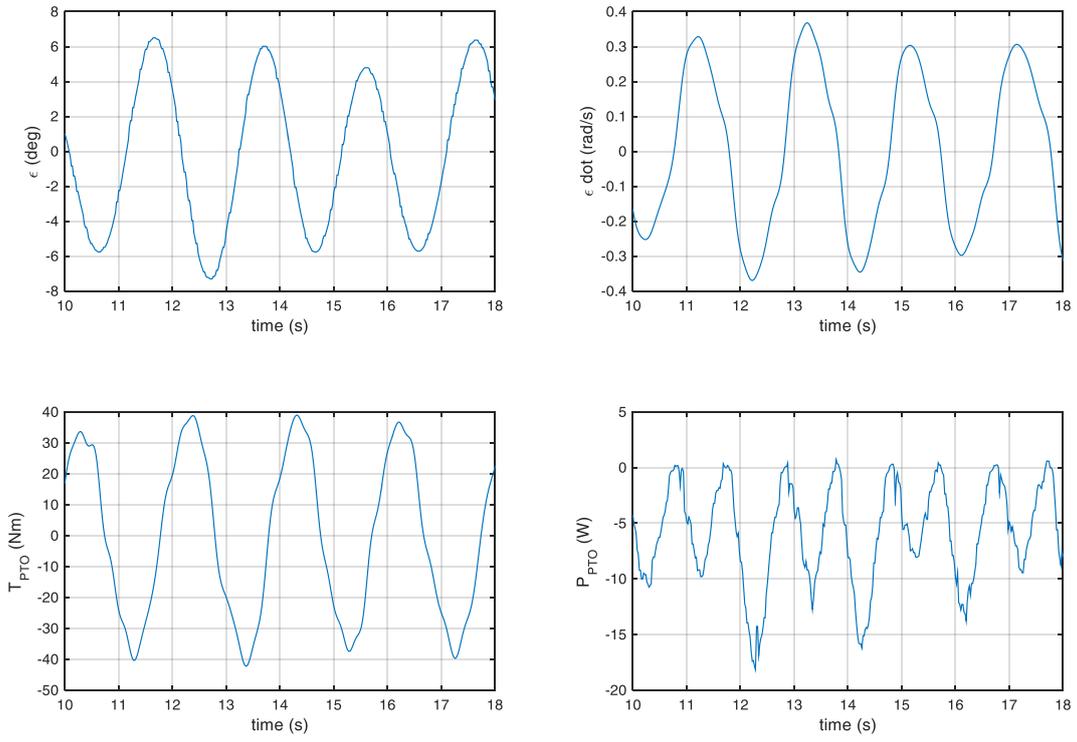
c053.mat



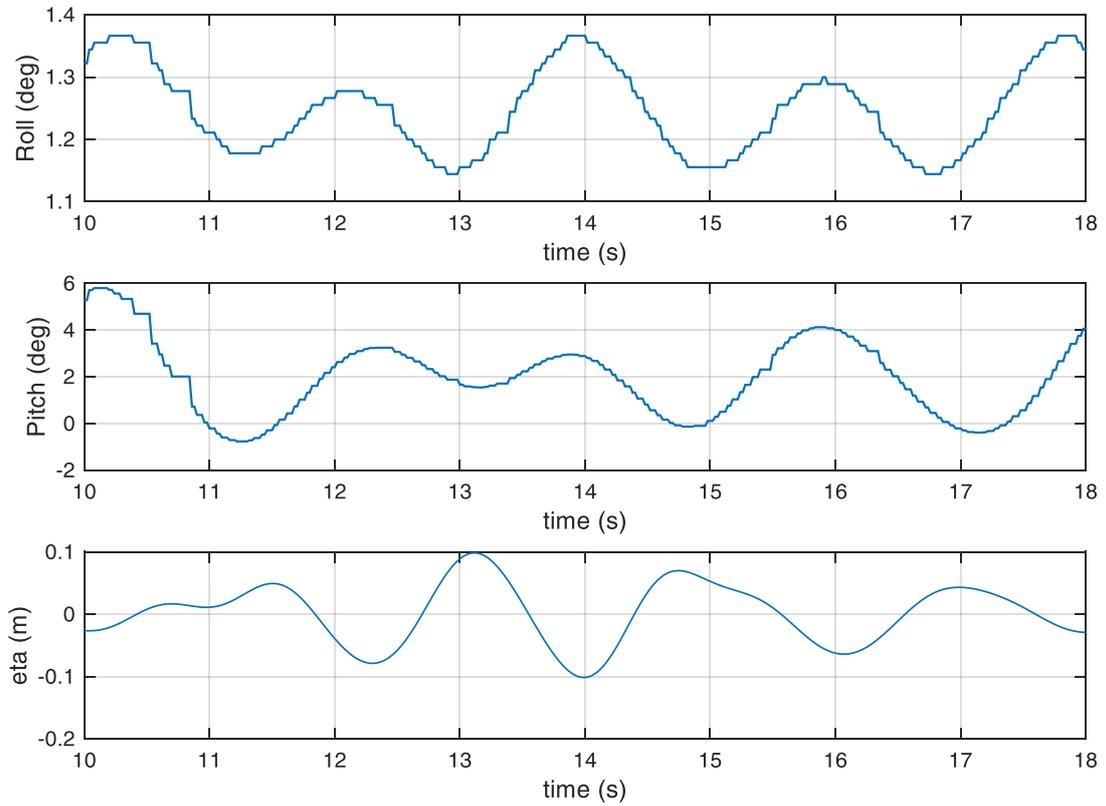
c053.mat



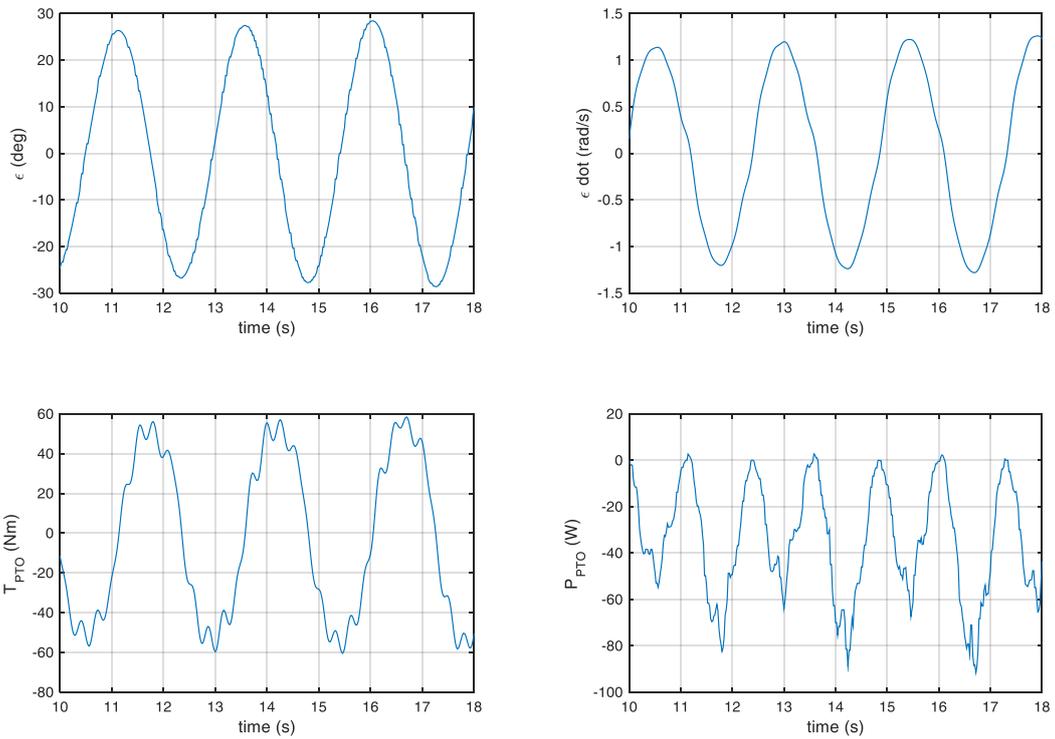
c054.mat



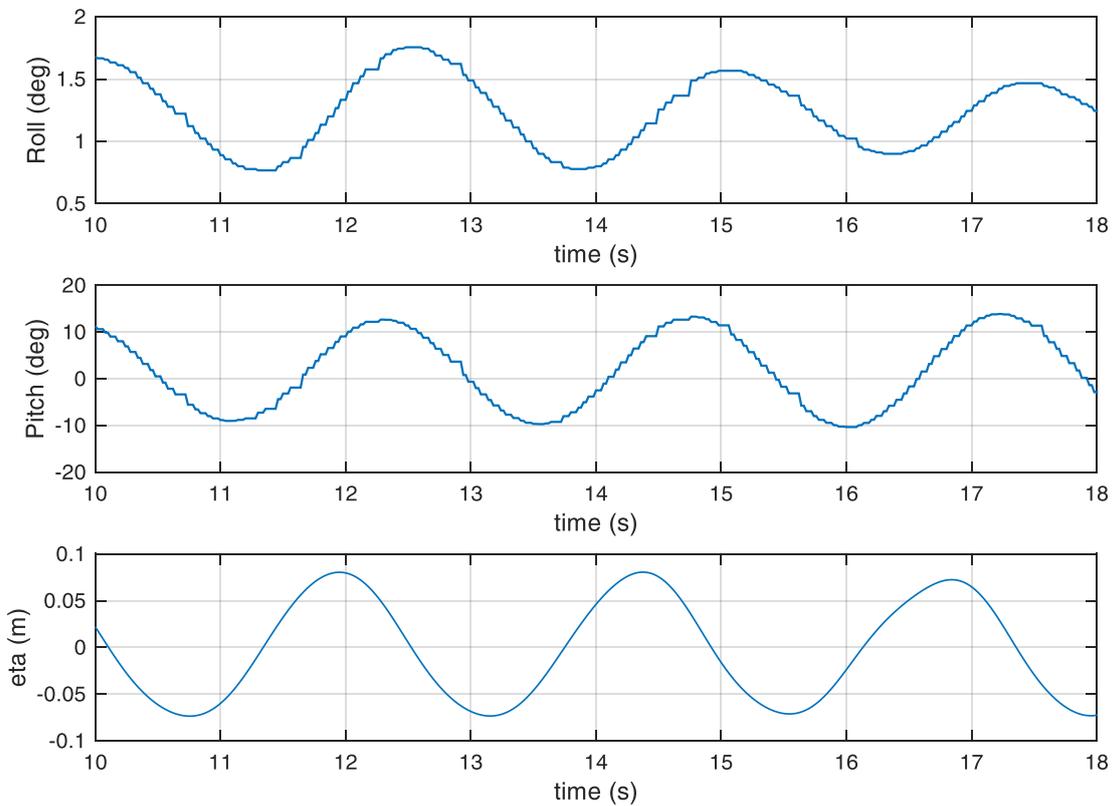
c054.mat



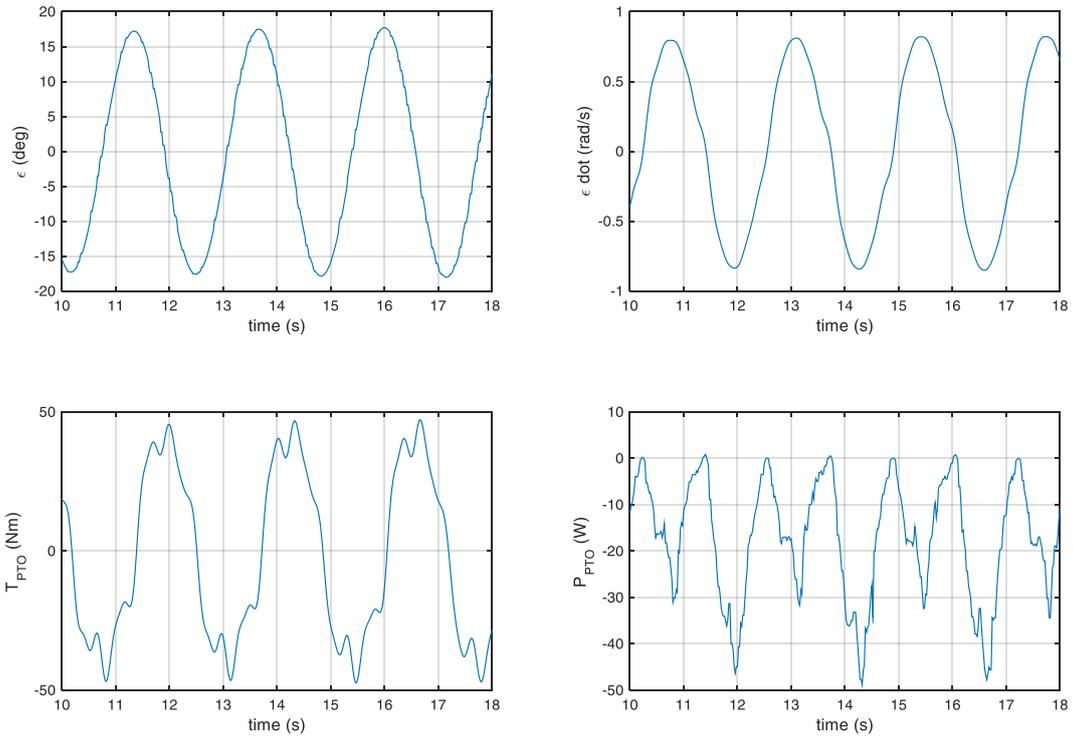
c055.mat



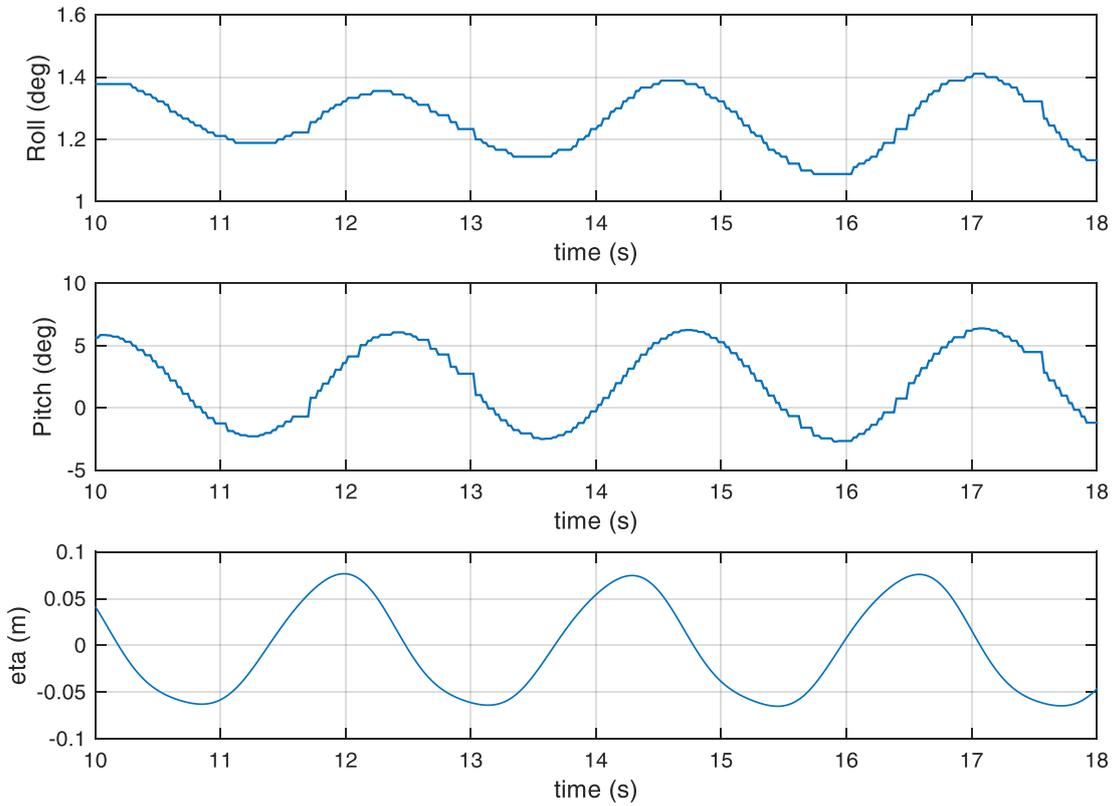
c055.mat



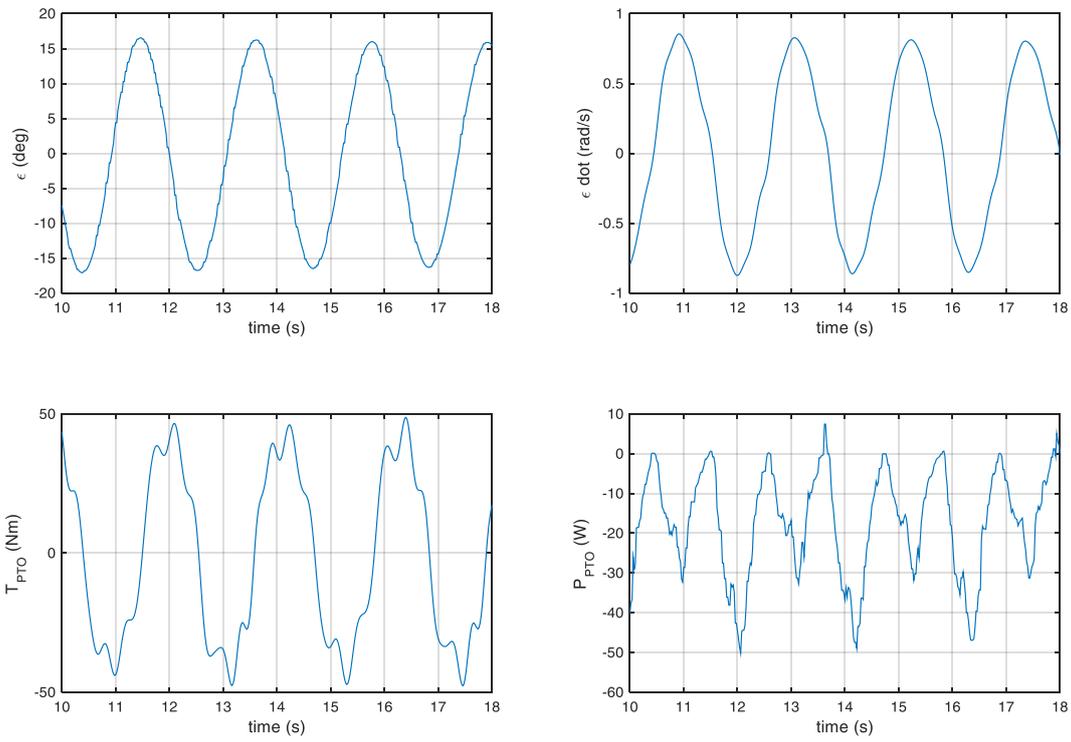
c056.mat



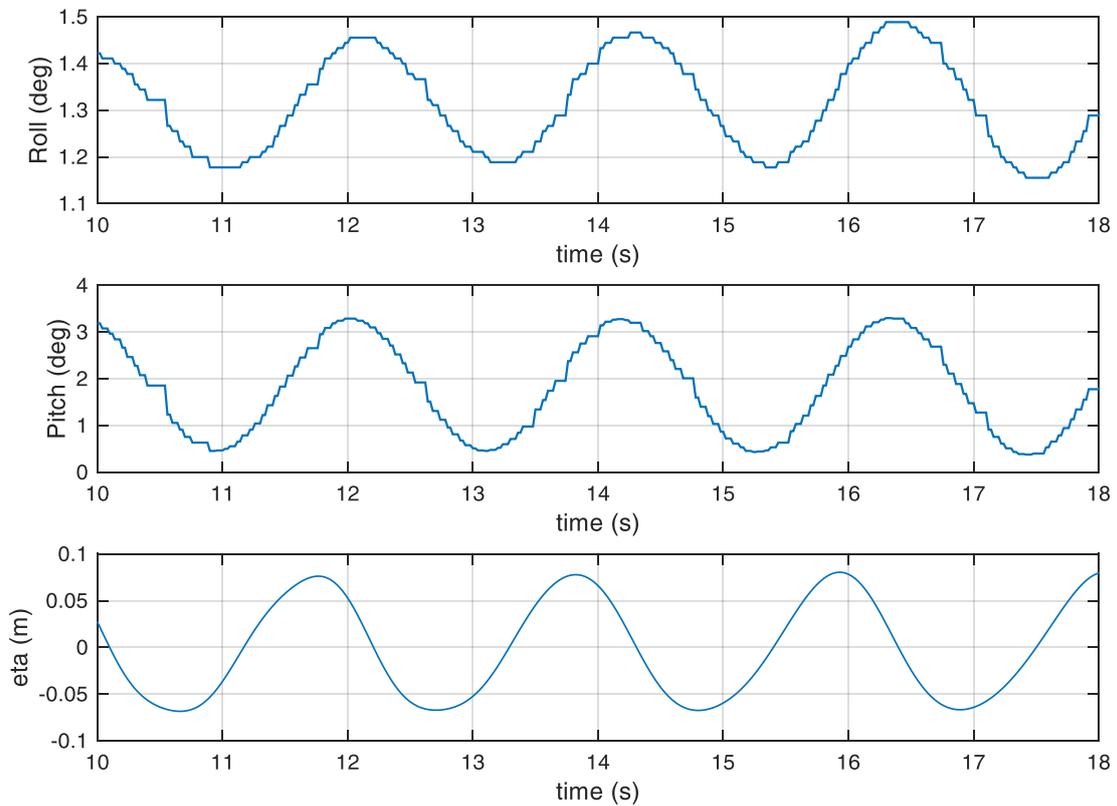
c056.mat



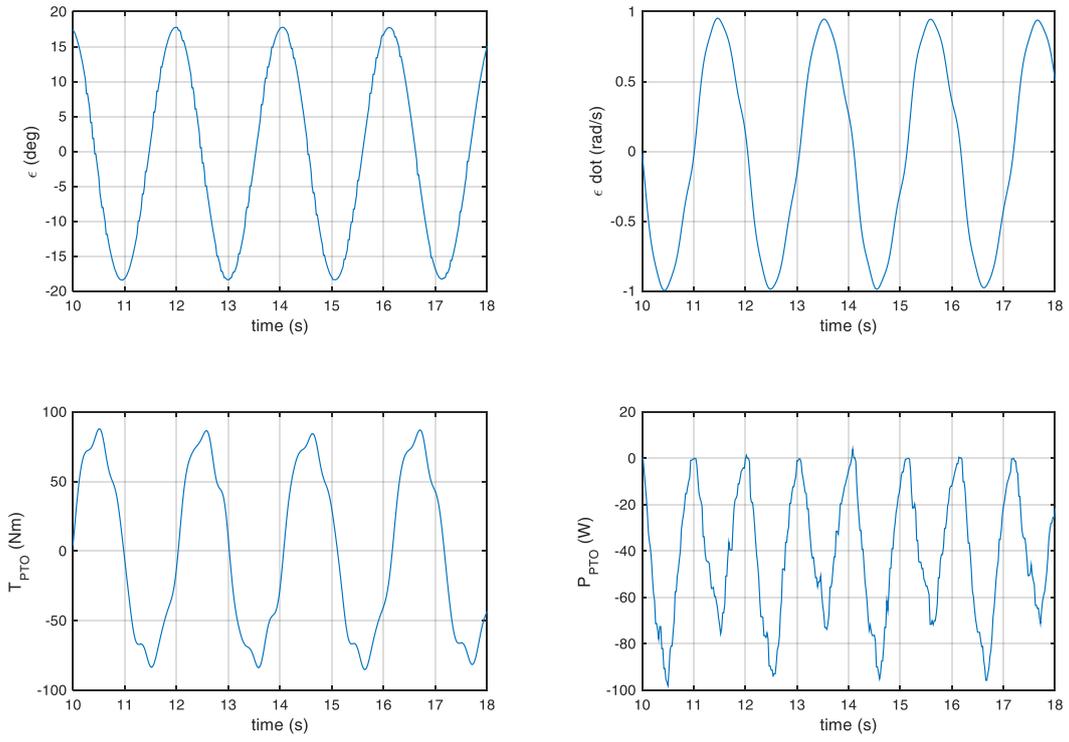
c057.mat



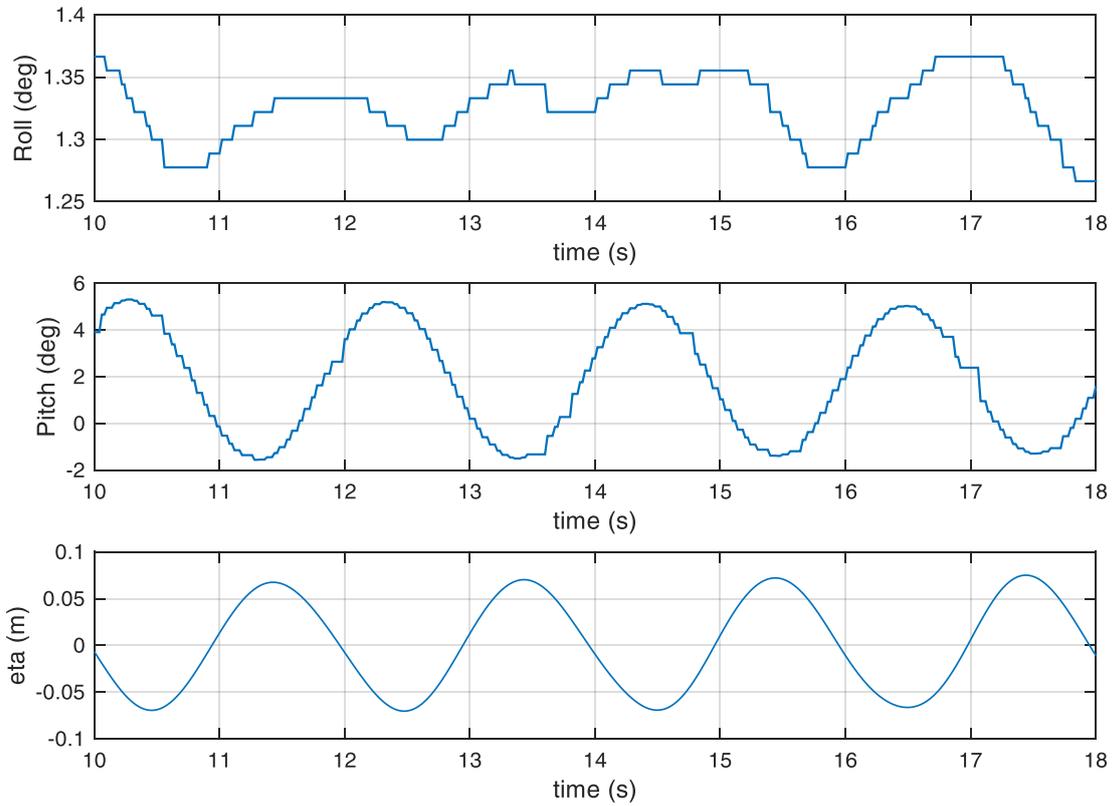
c057.mat



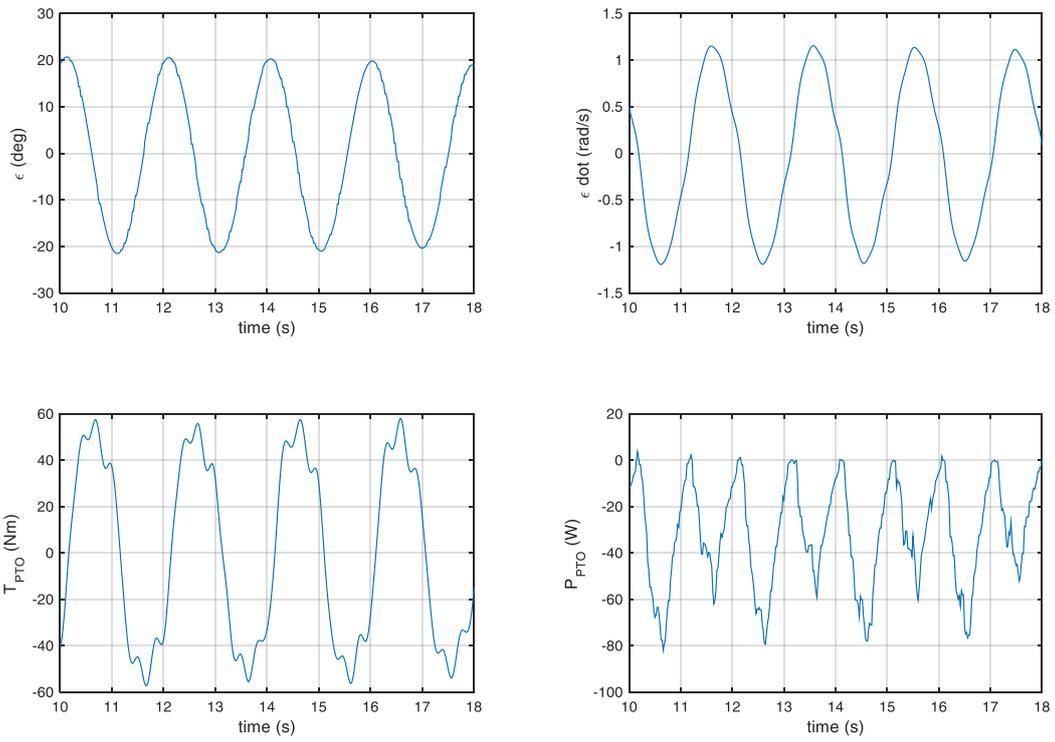
c058.mat



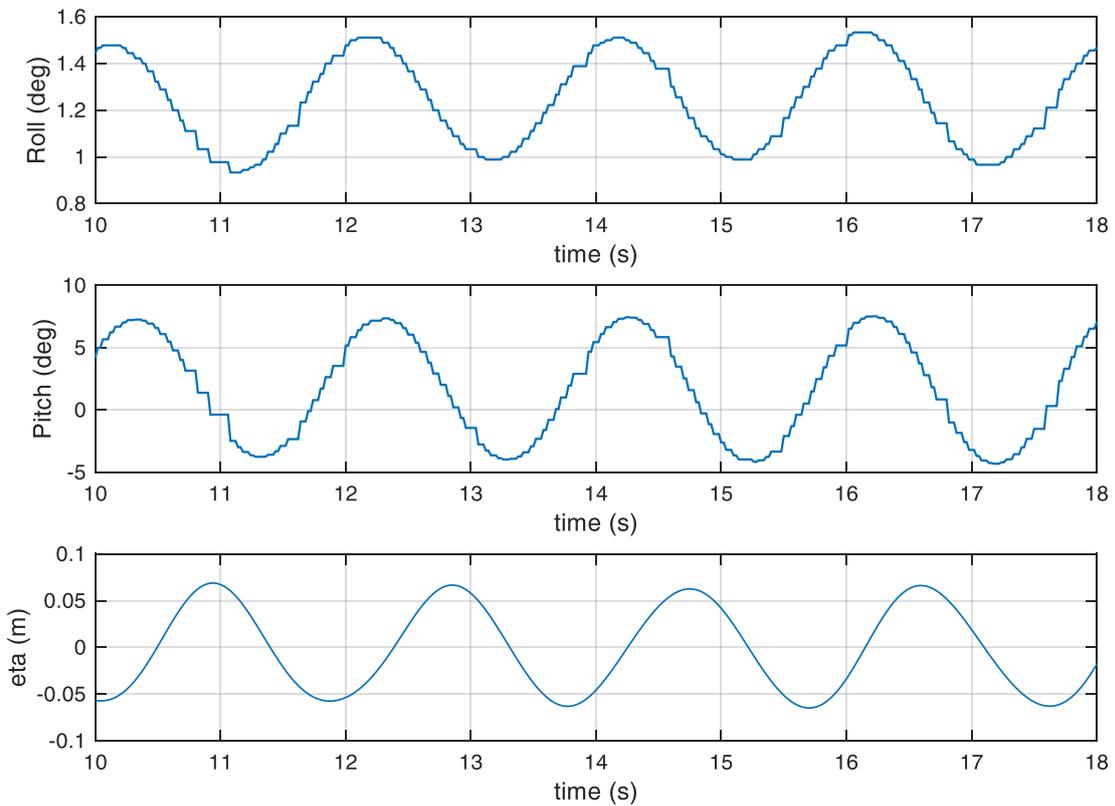
c058.mat



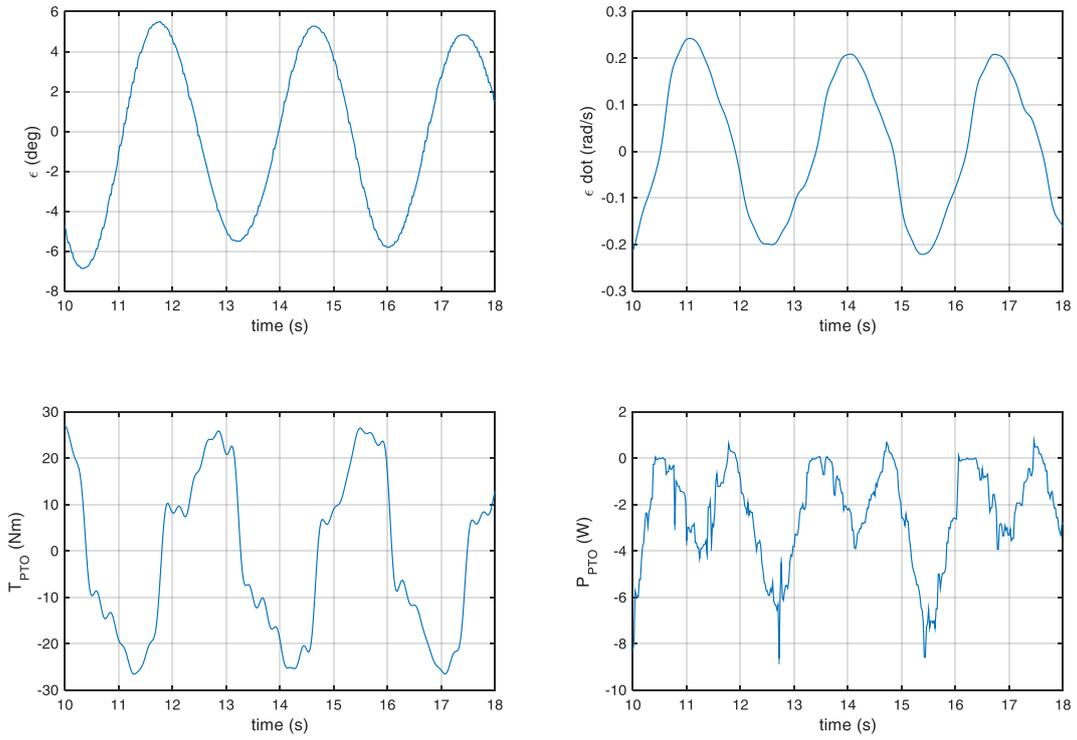
c059.mat



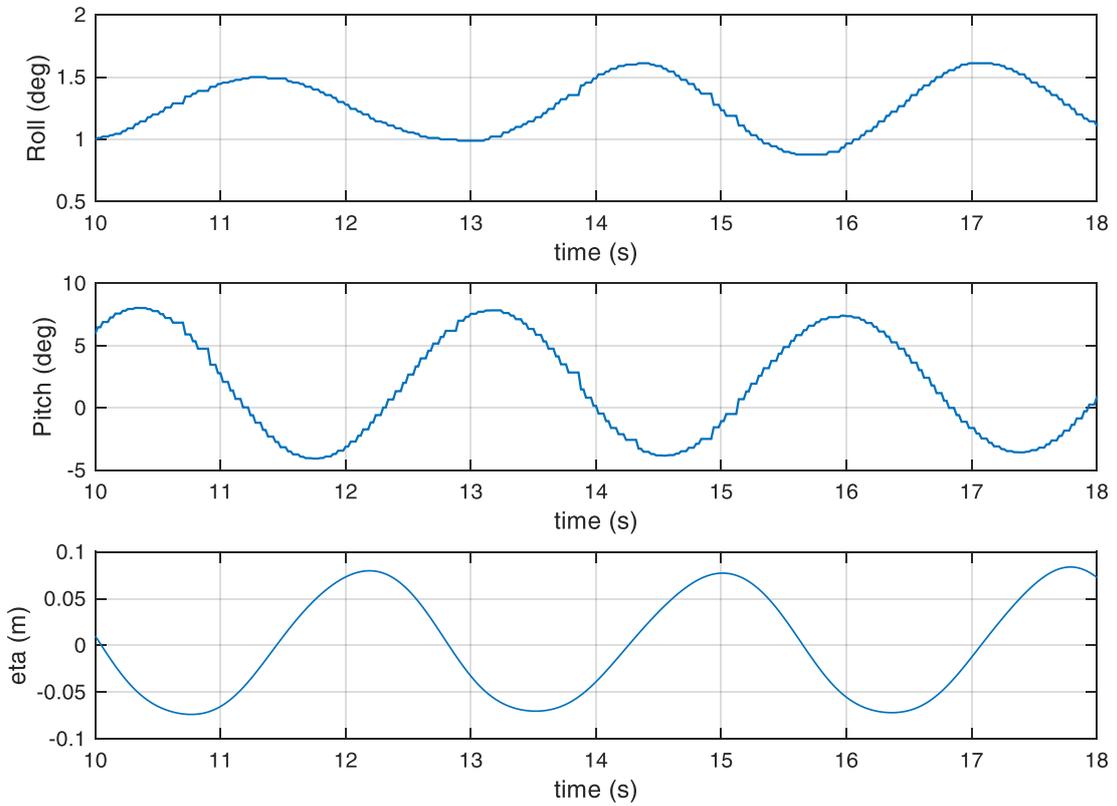
c059.mat



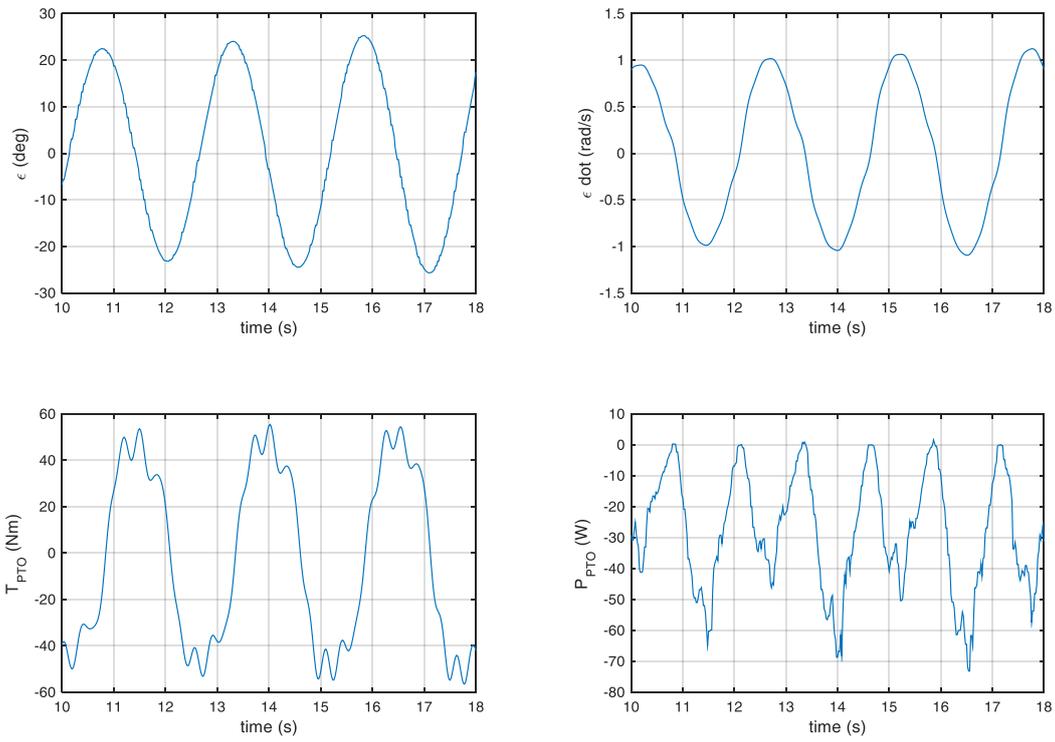
c060.mat



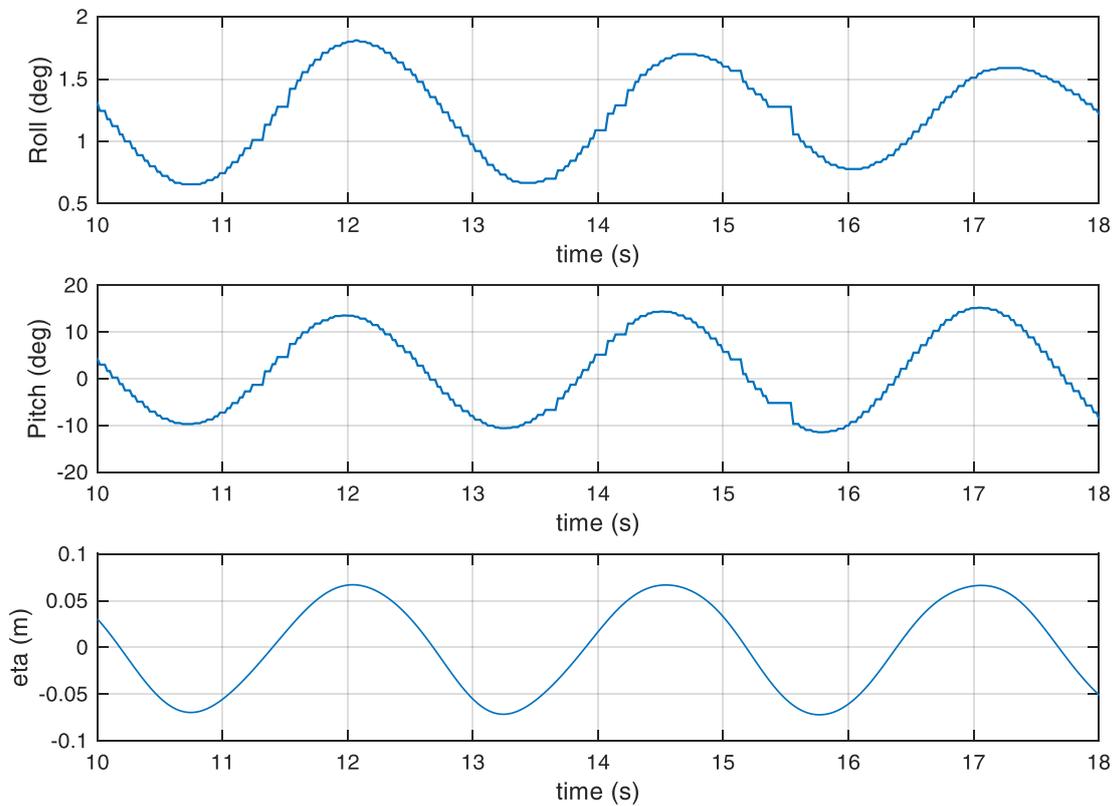
c060.mat



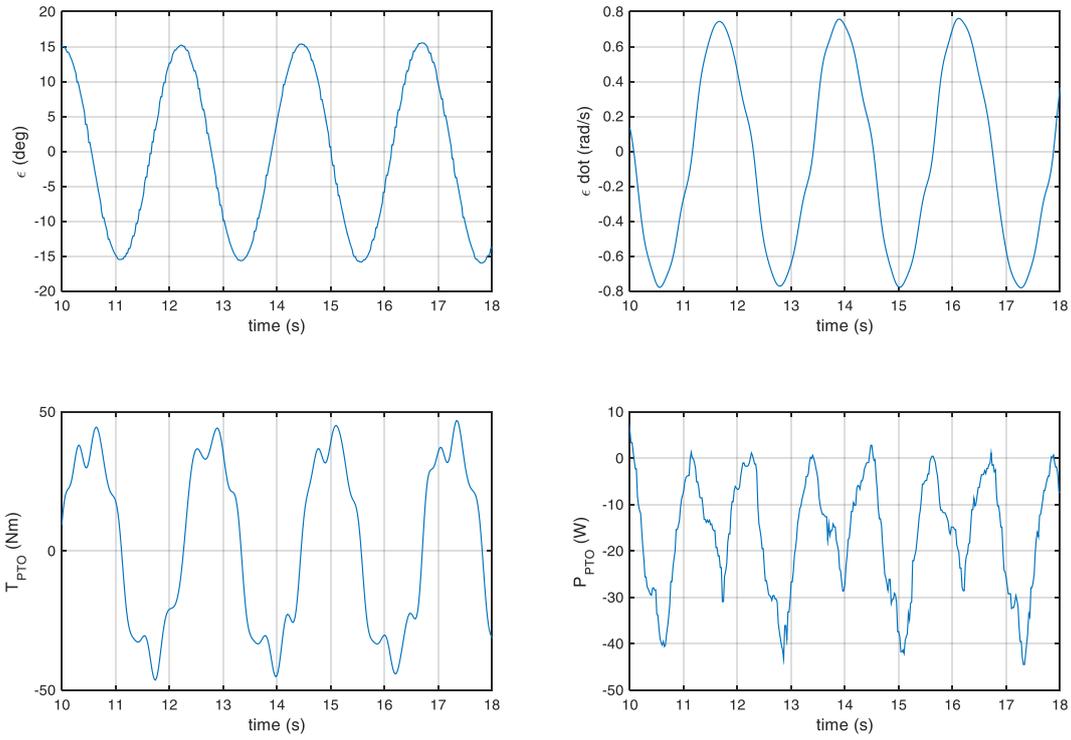
c061.mat



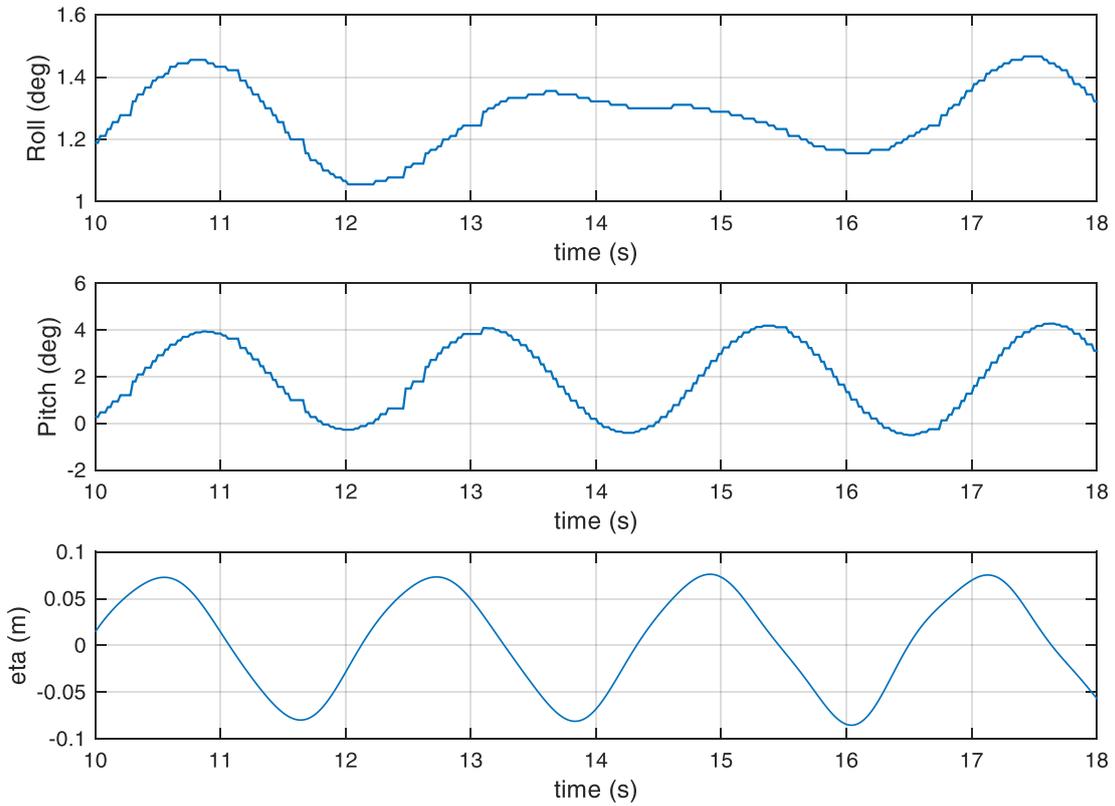
c061.mat



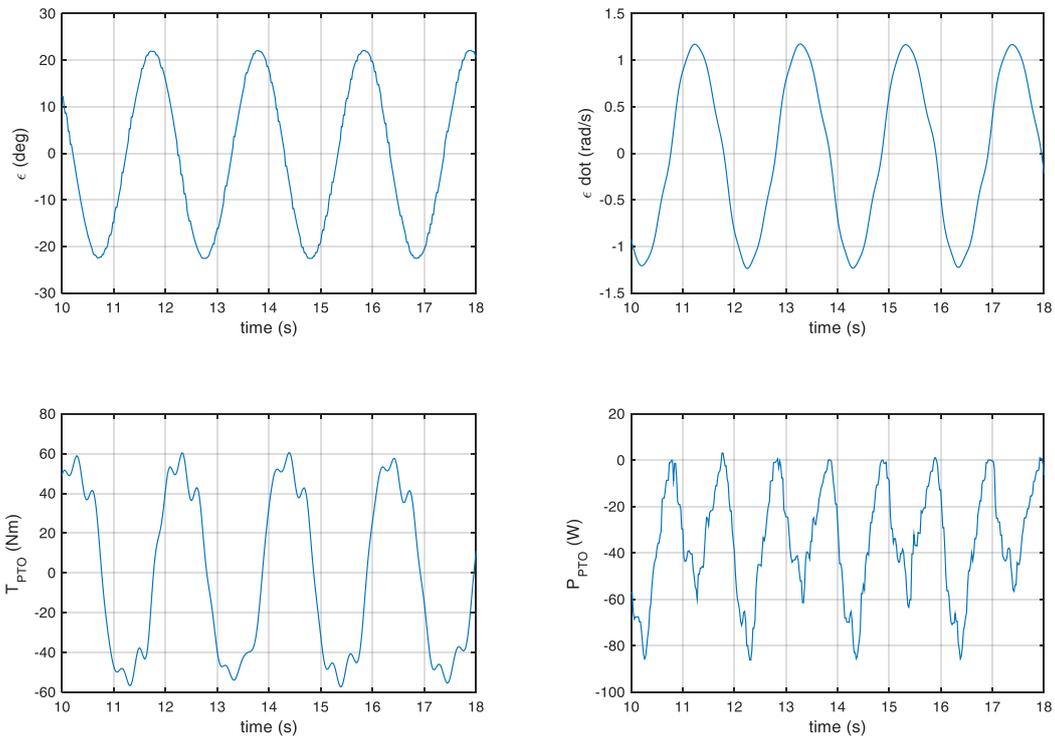
c062.mat



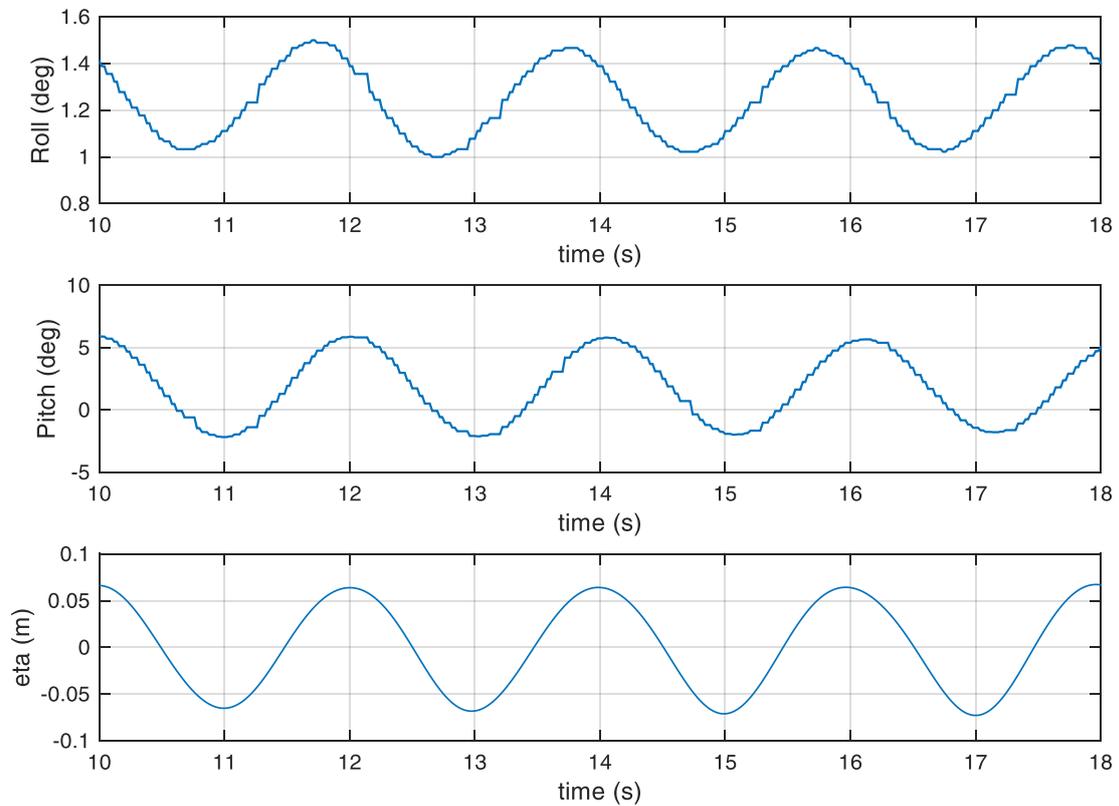
c062.mat



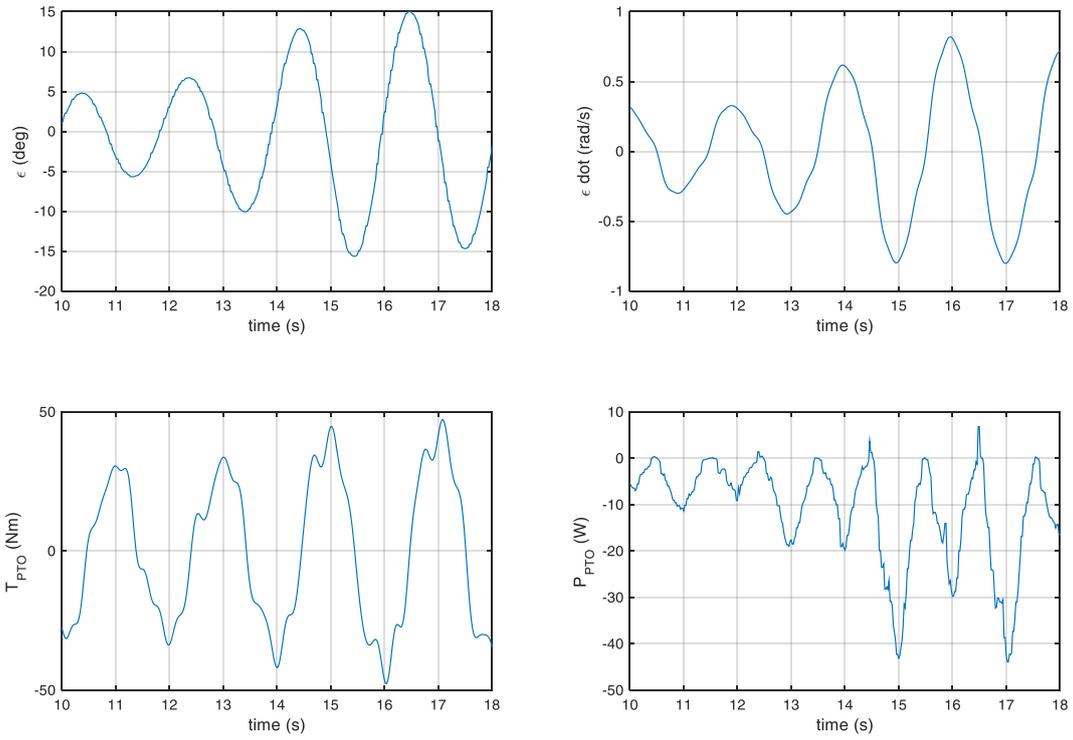
c063.mat



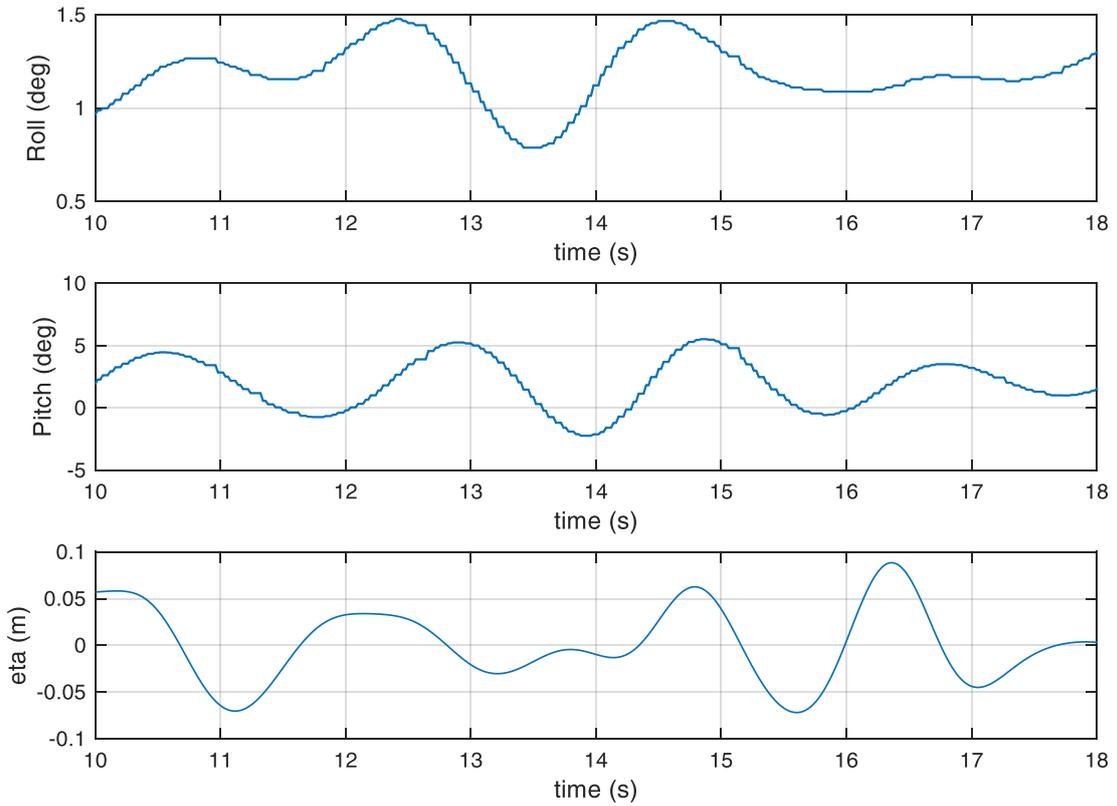
c063.mat



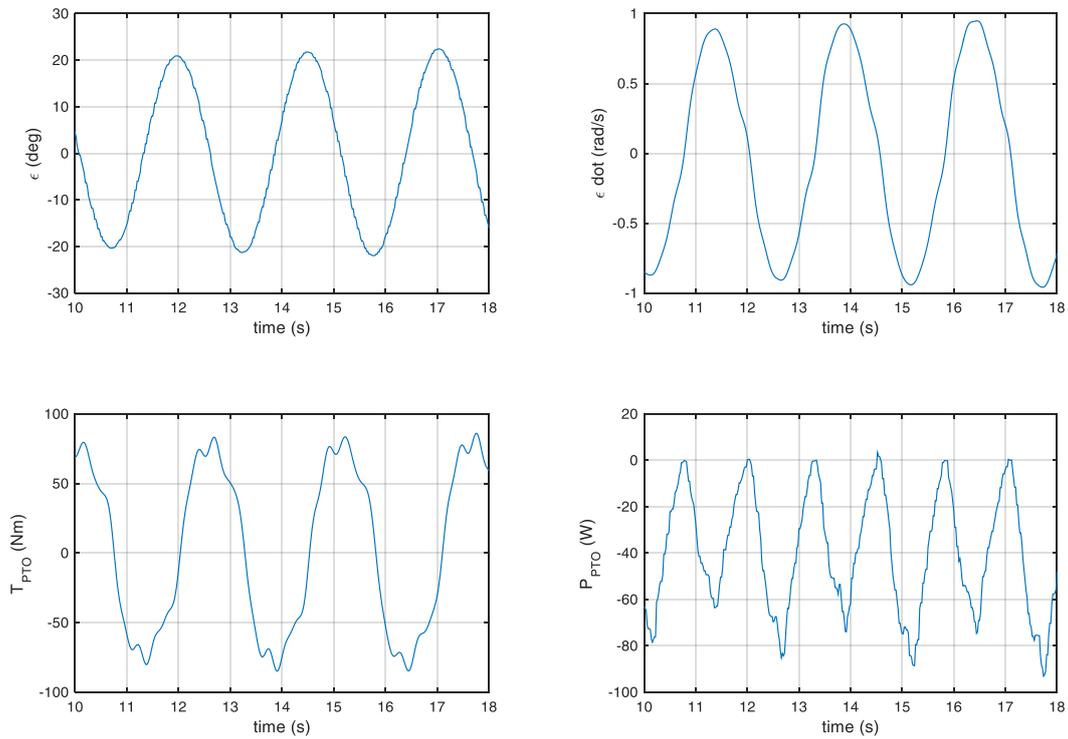
c064.mat



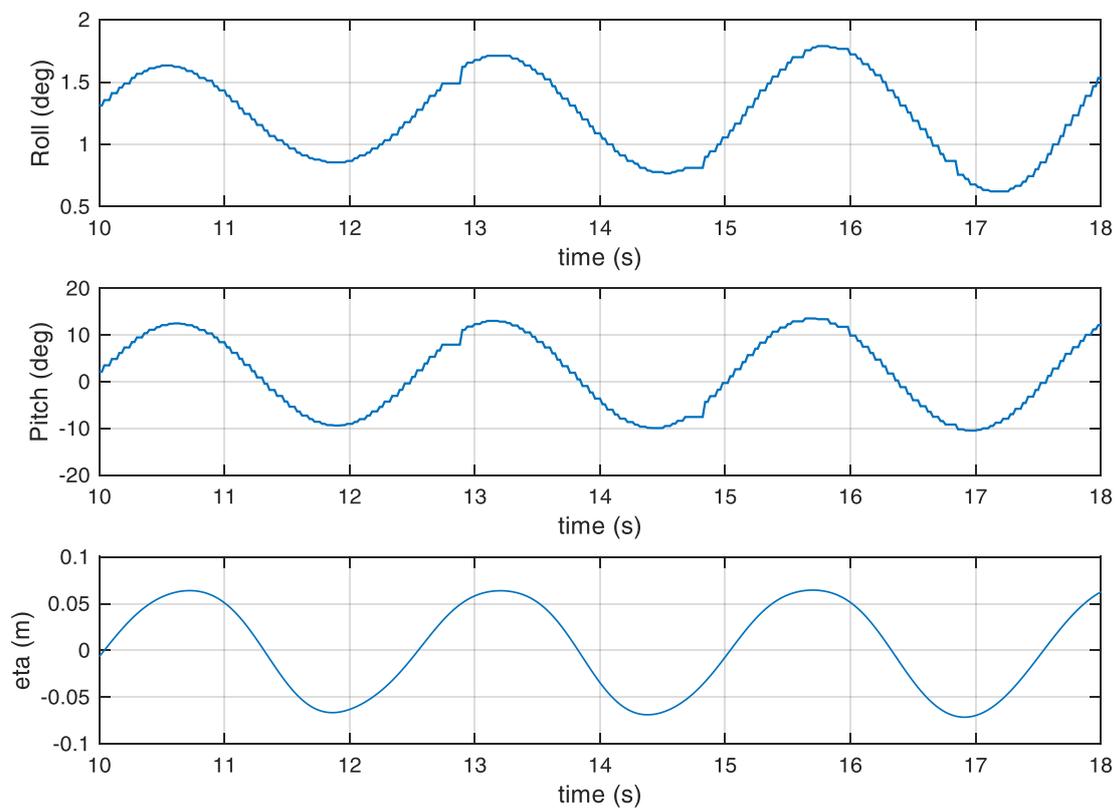
c064.mat



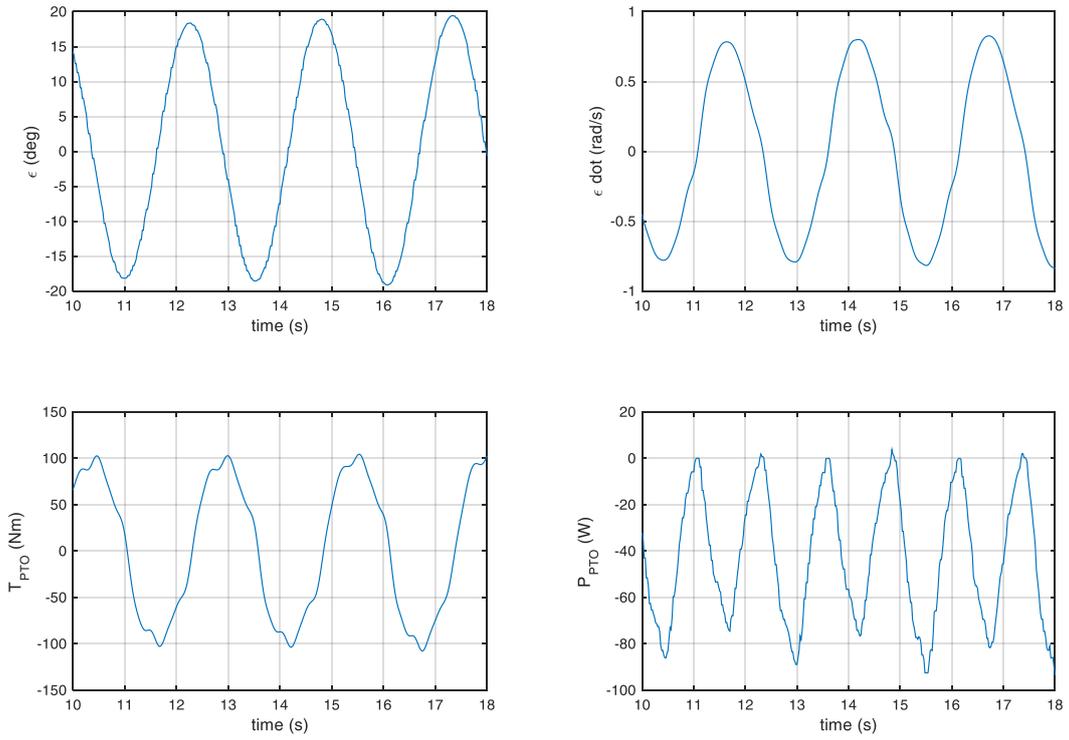
c065.mat



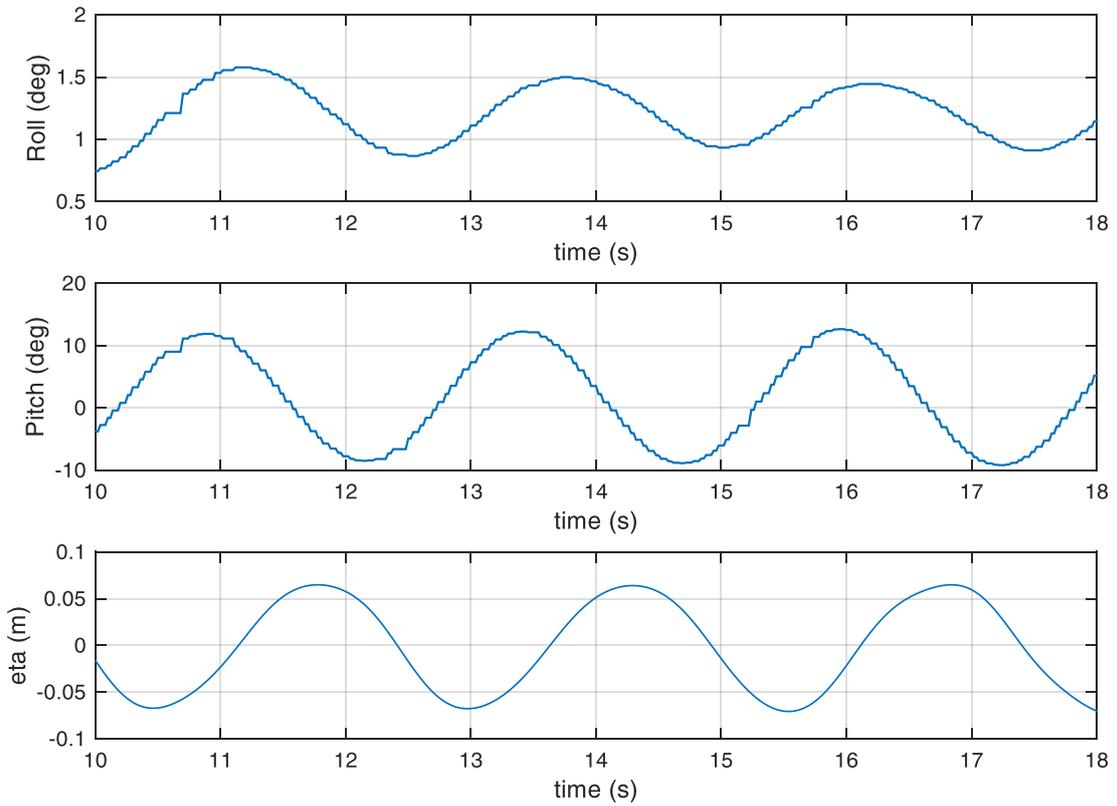
c065.mat



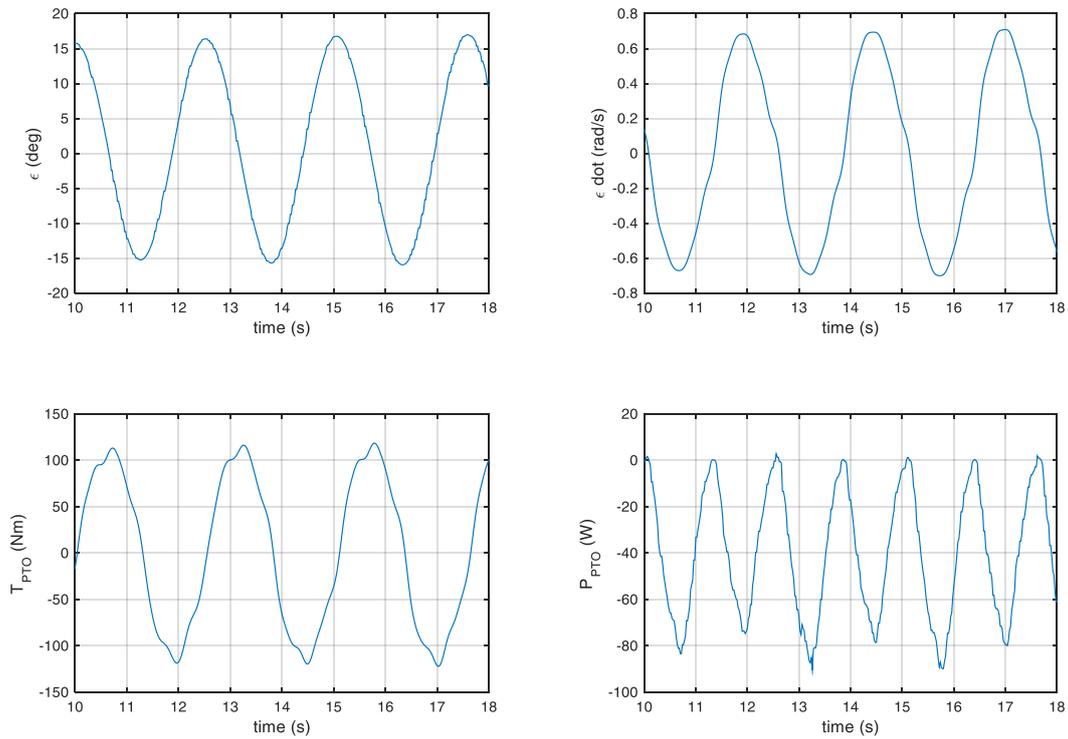
c066.mat



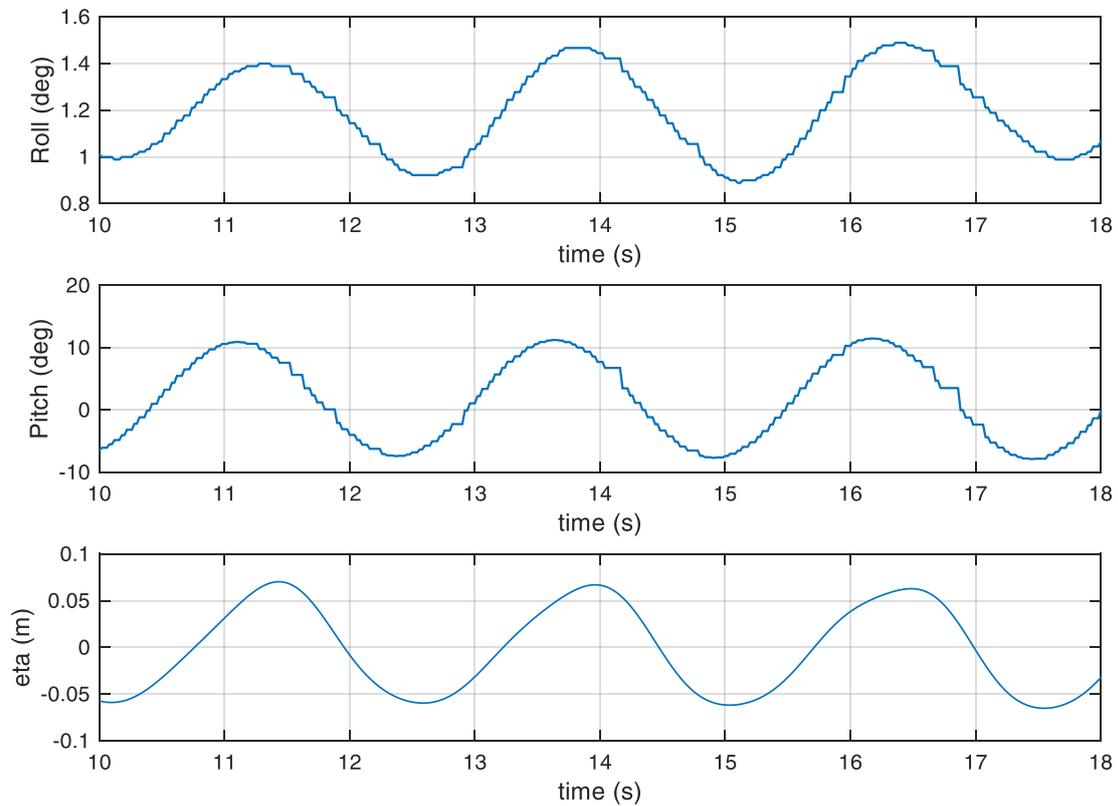
c066.mat



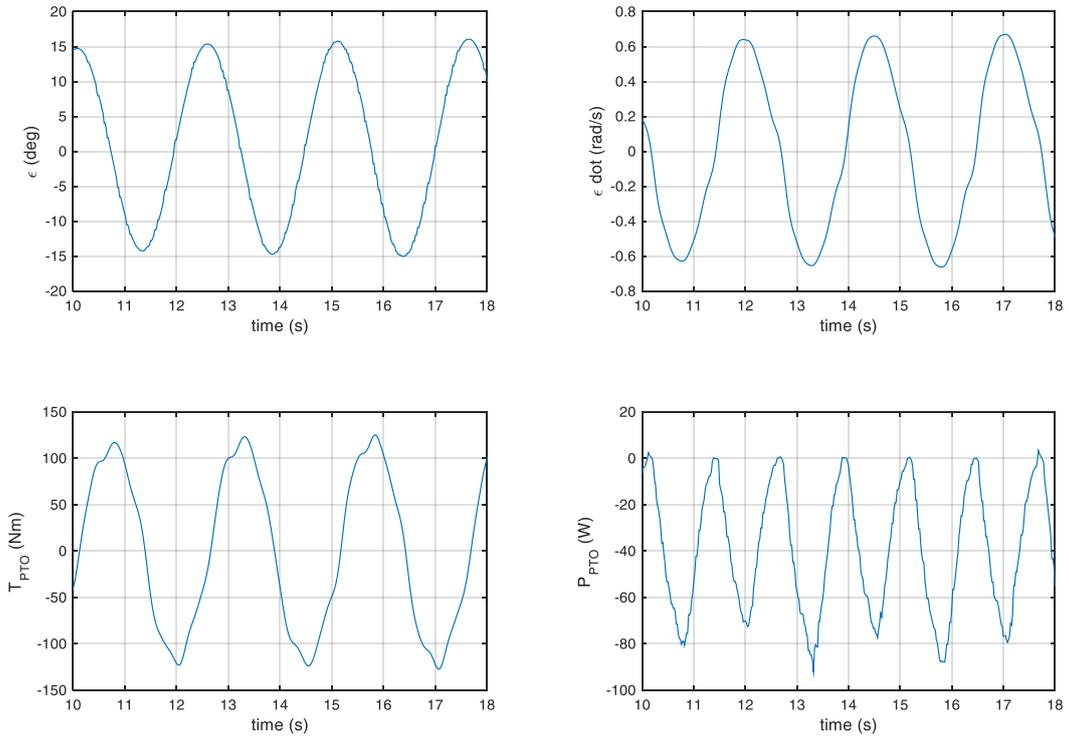
c067.mat



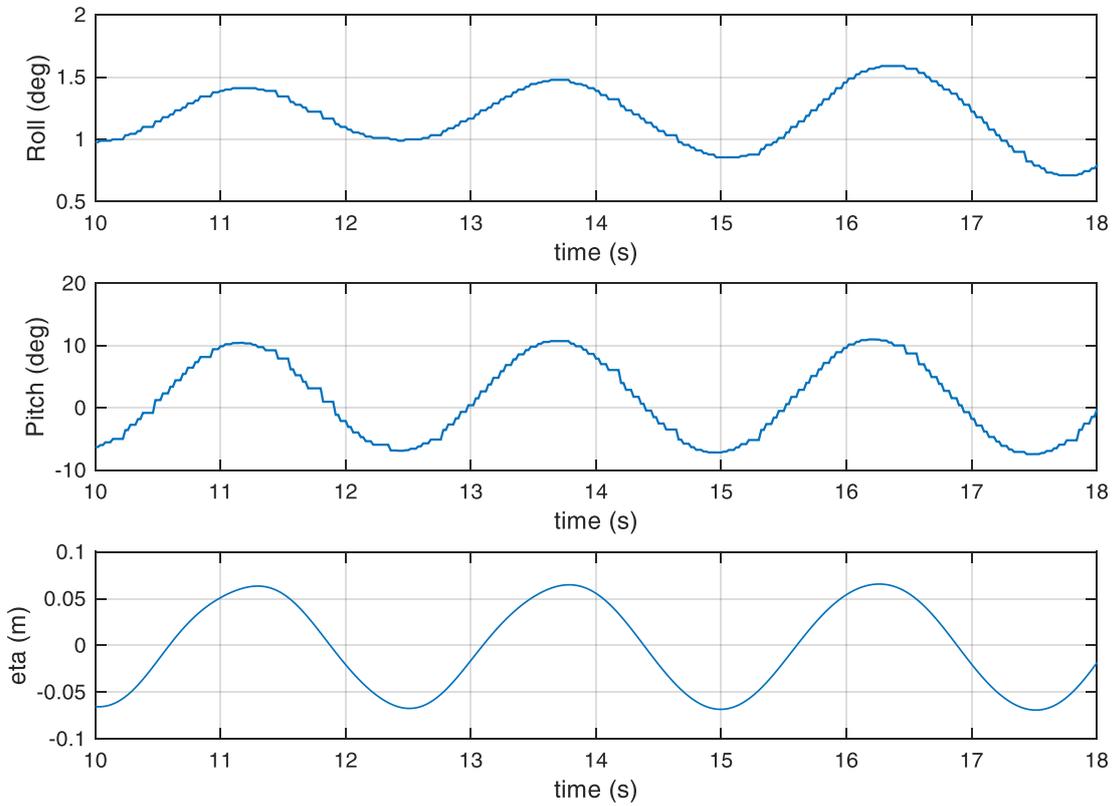
c067.mat



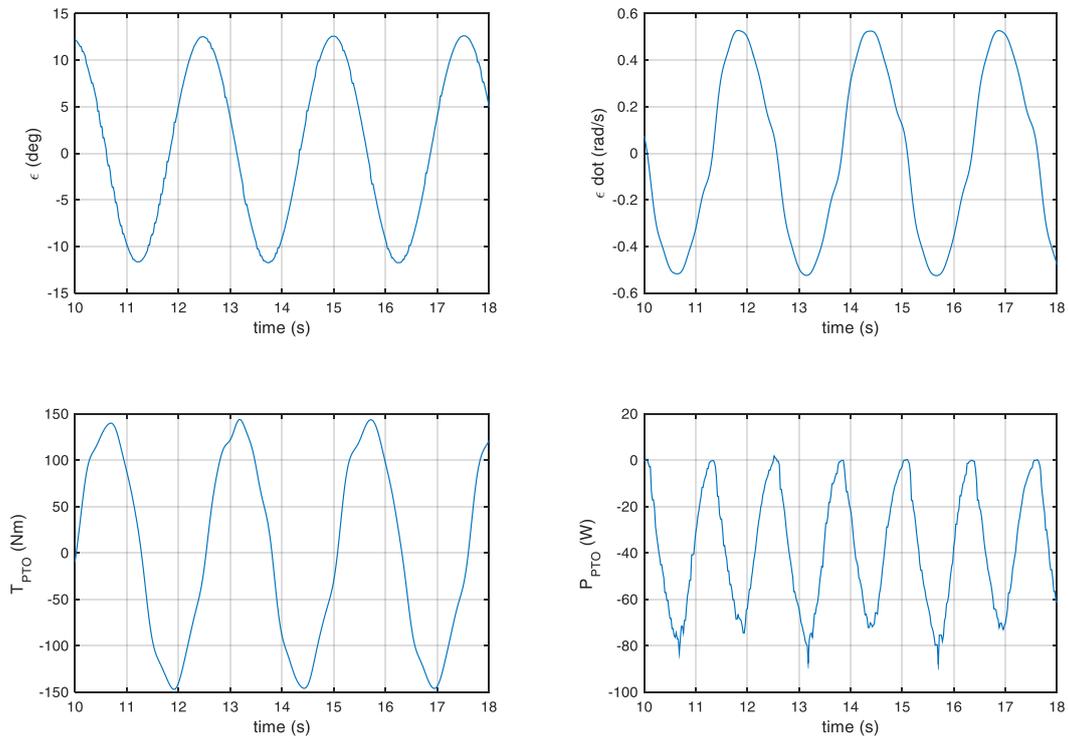
c068.mat



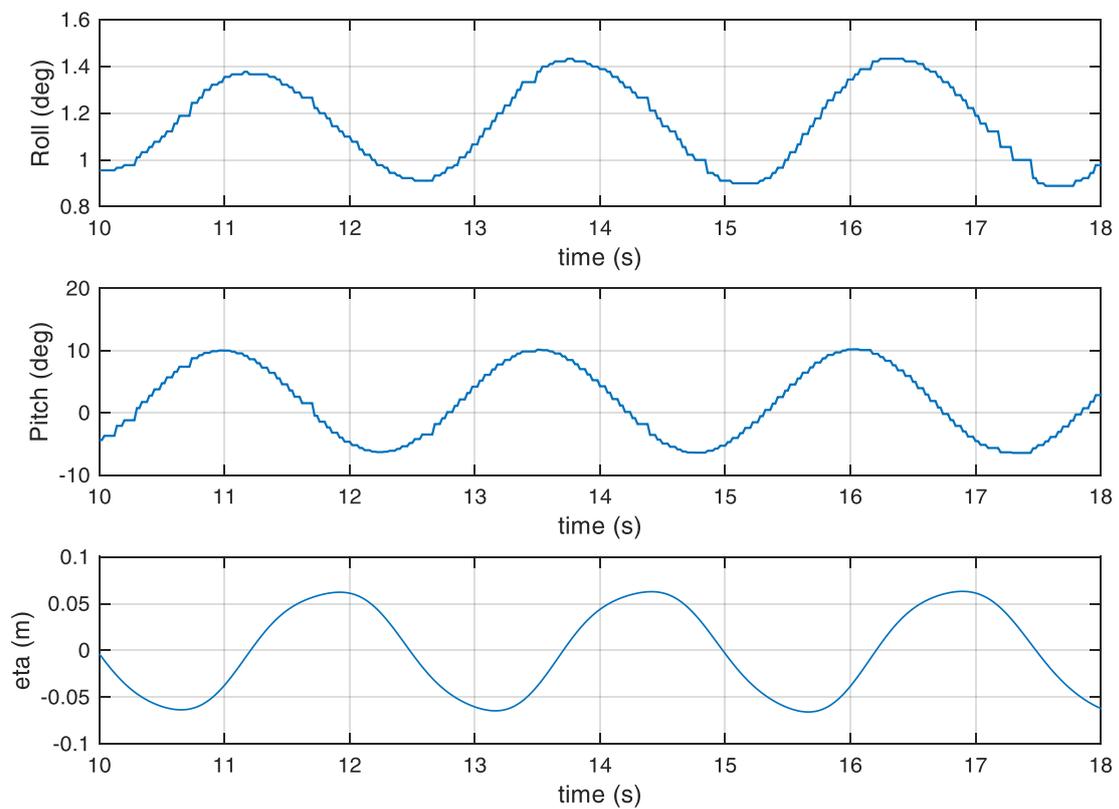
c068.mat



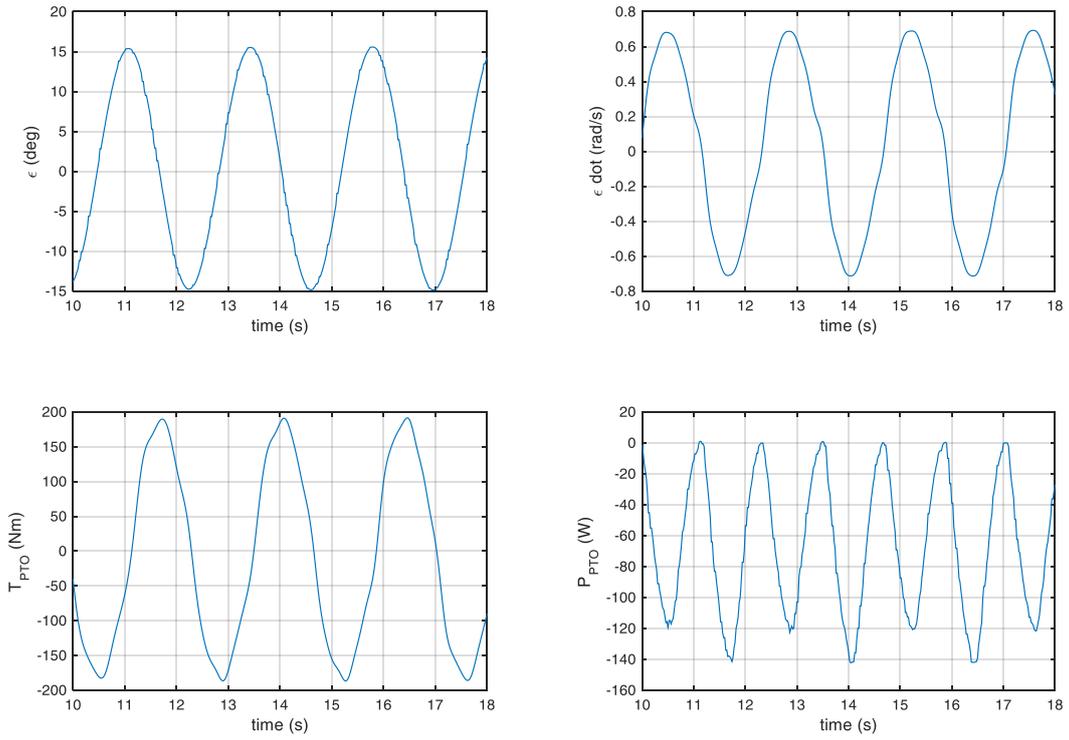
c069.mat



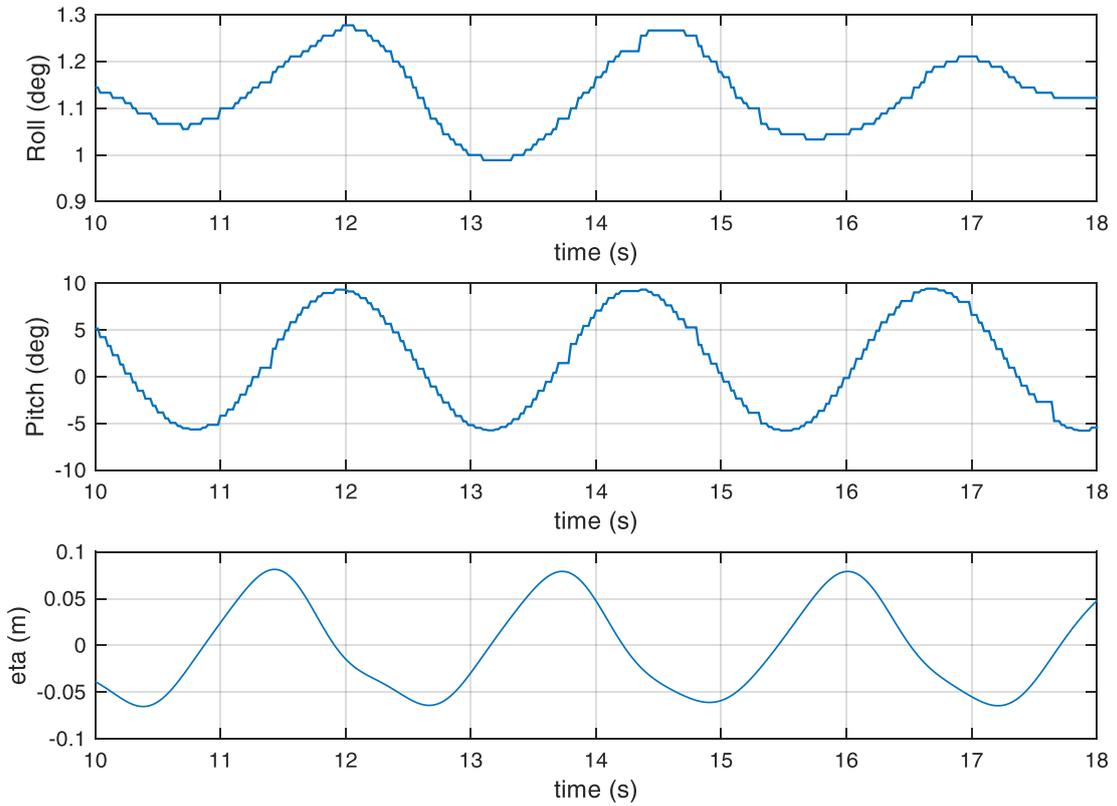
c069.mat



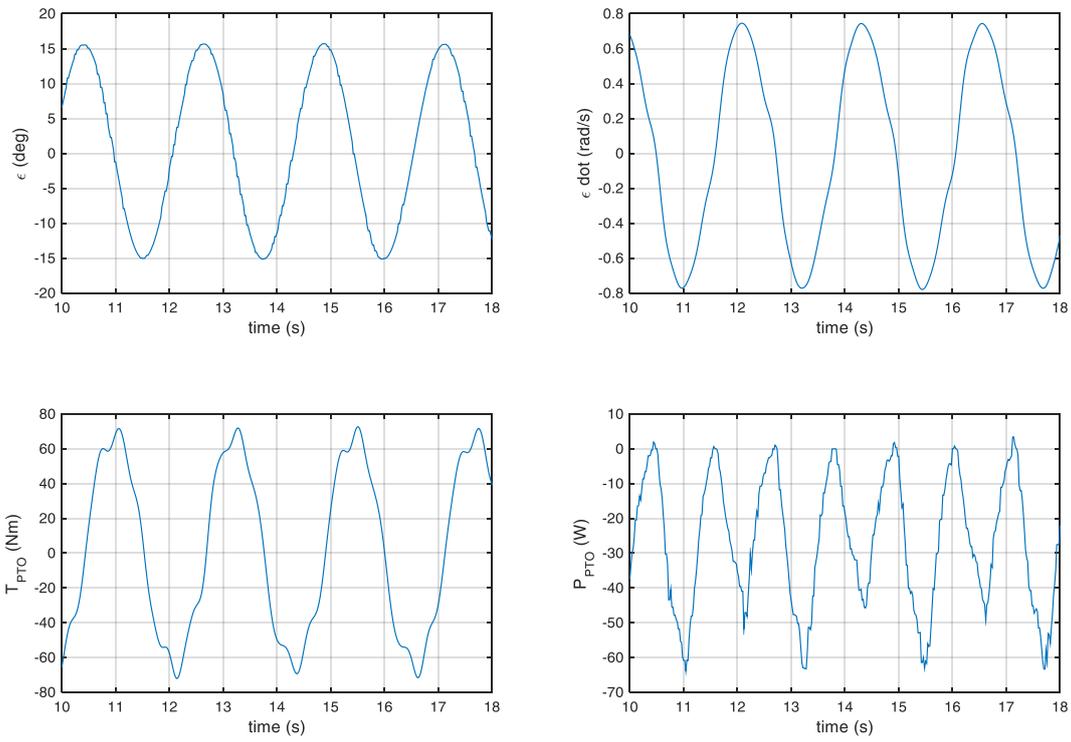
c070.mat



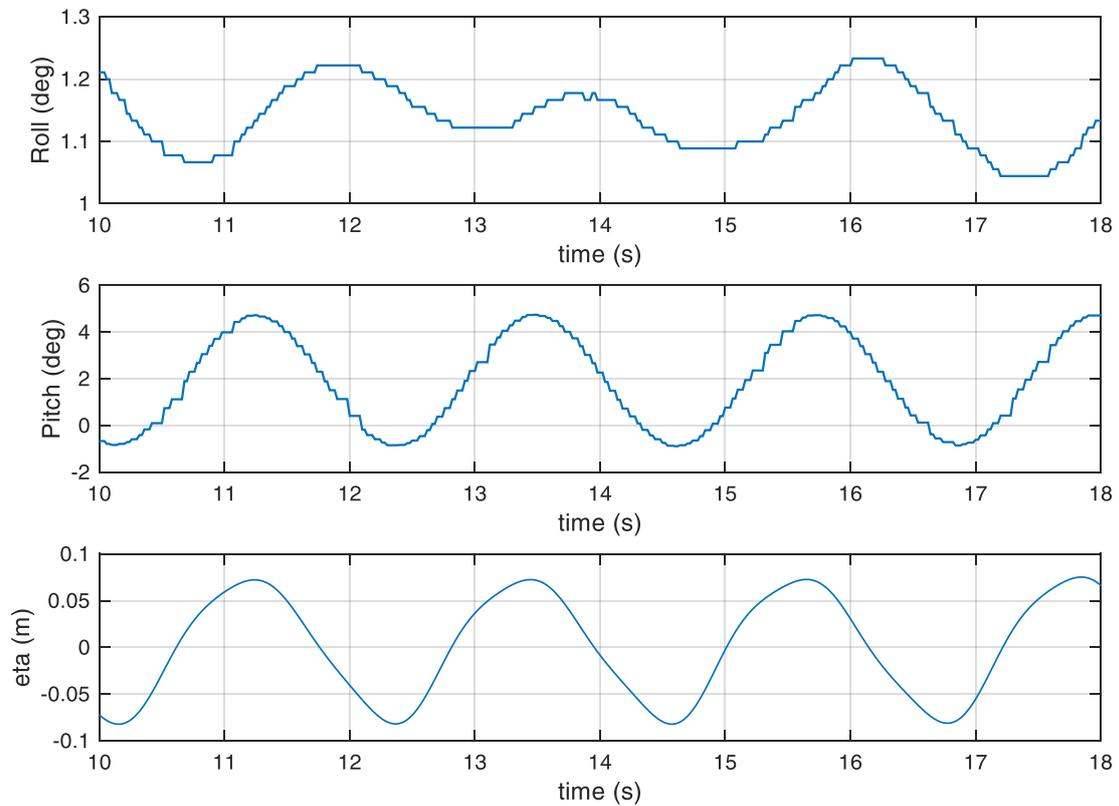
c070.mat



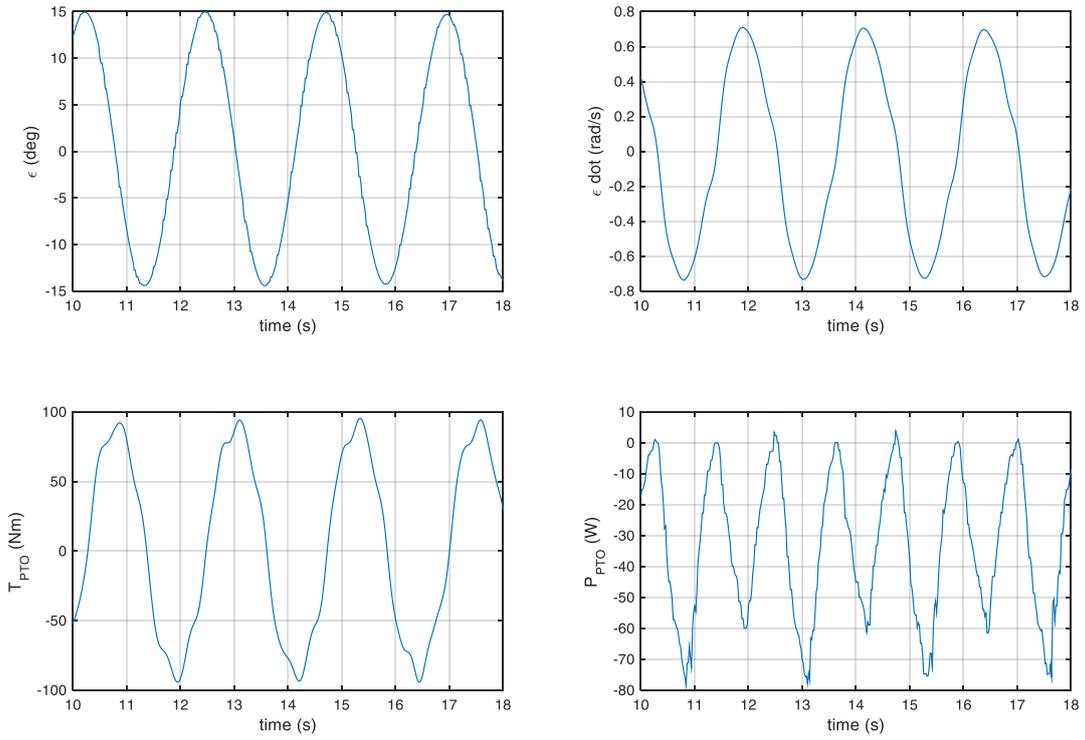
c071.mat



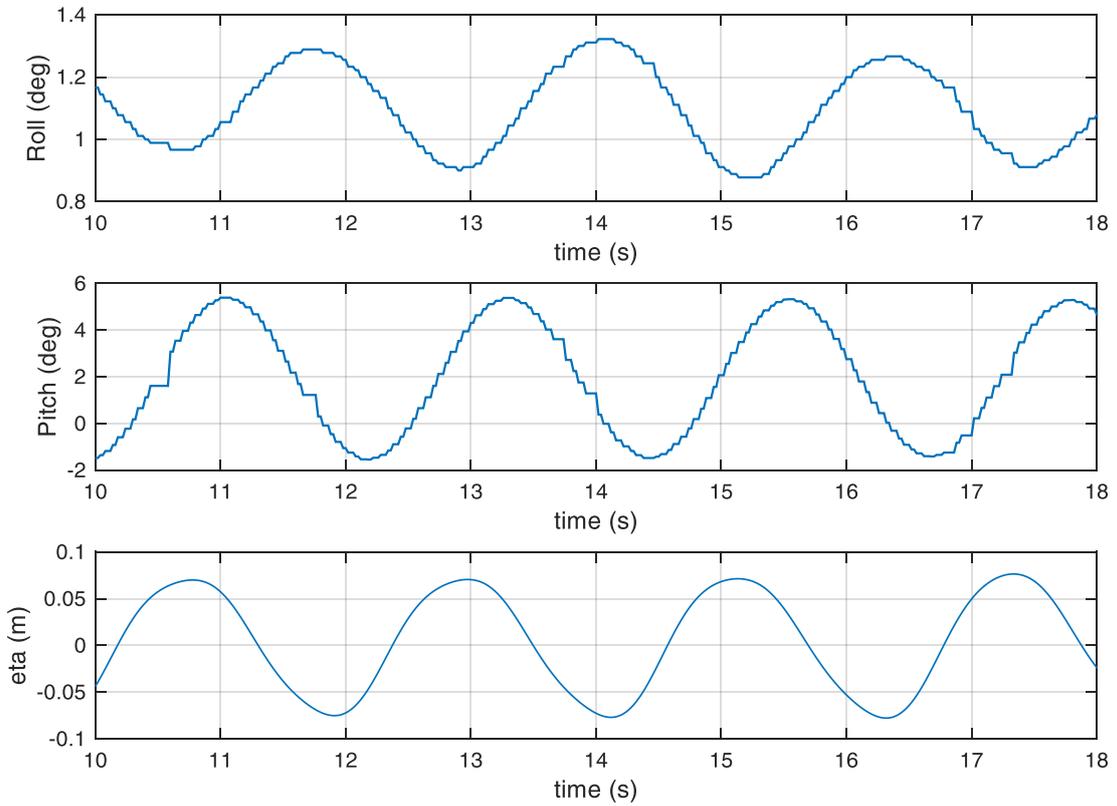
c071.mat



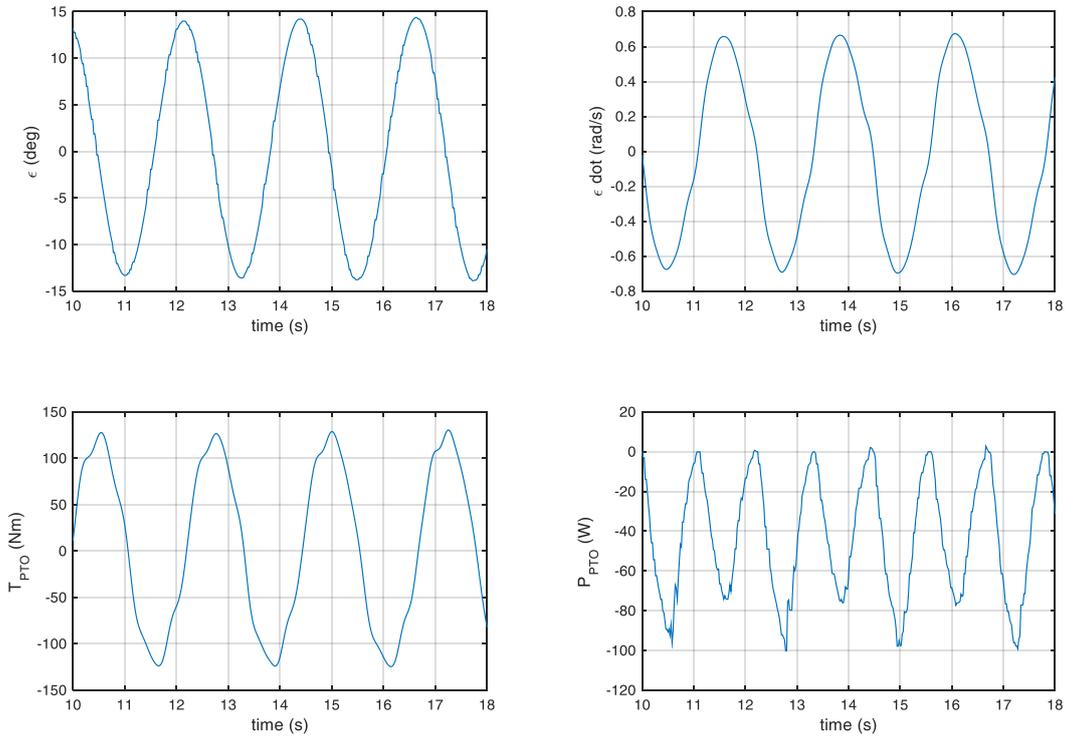
c072.mat



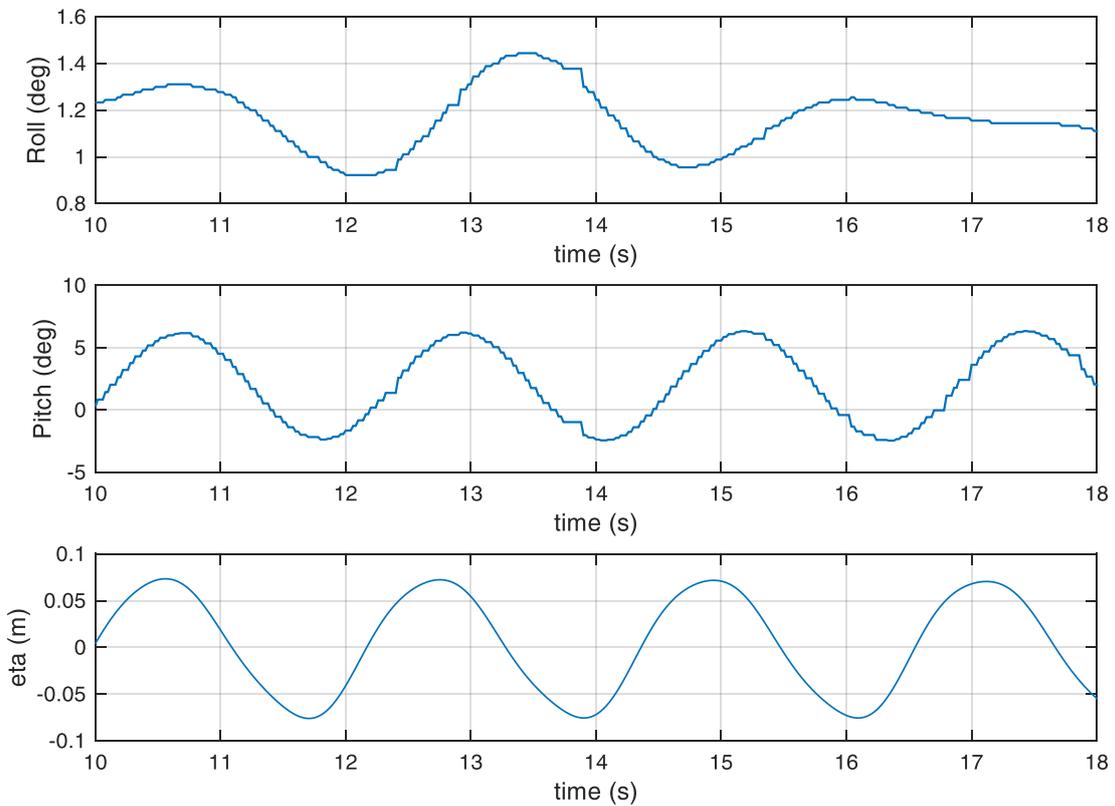
c072.mat



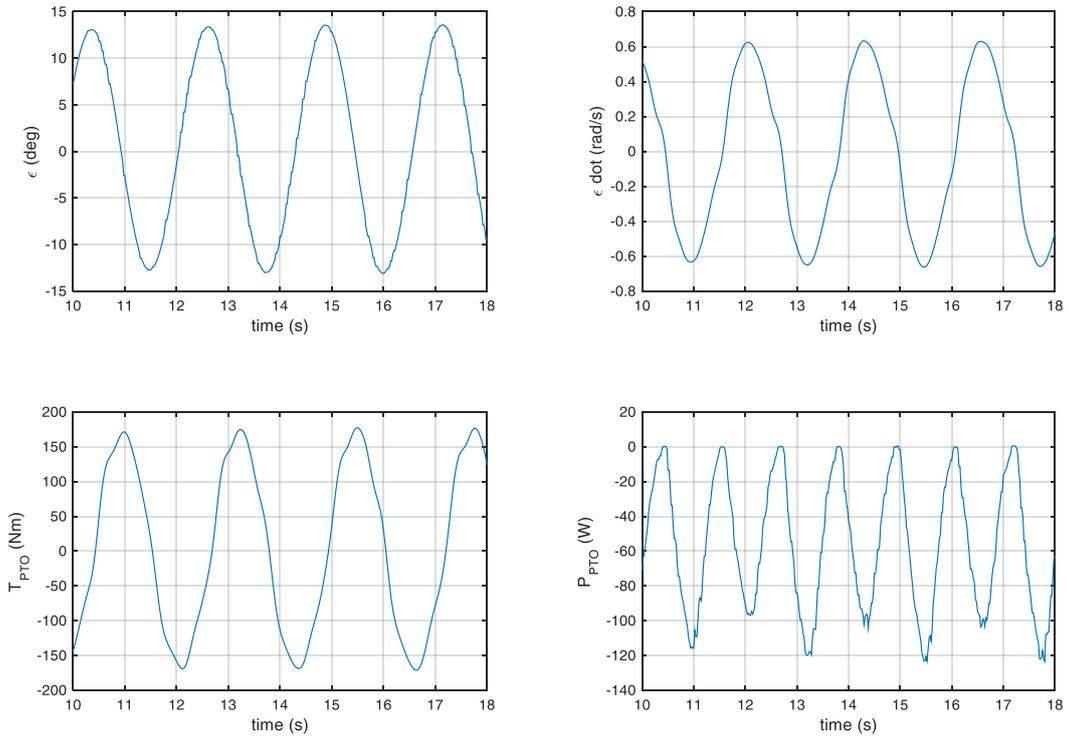
c073.mat



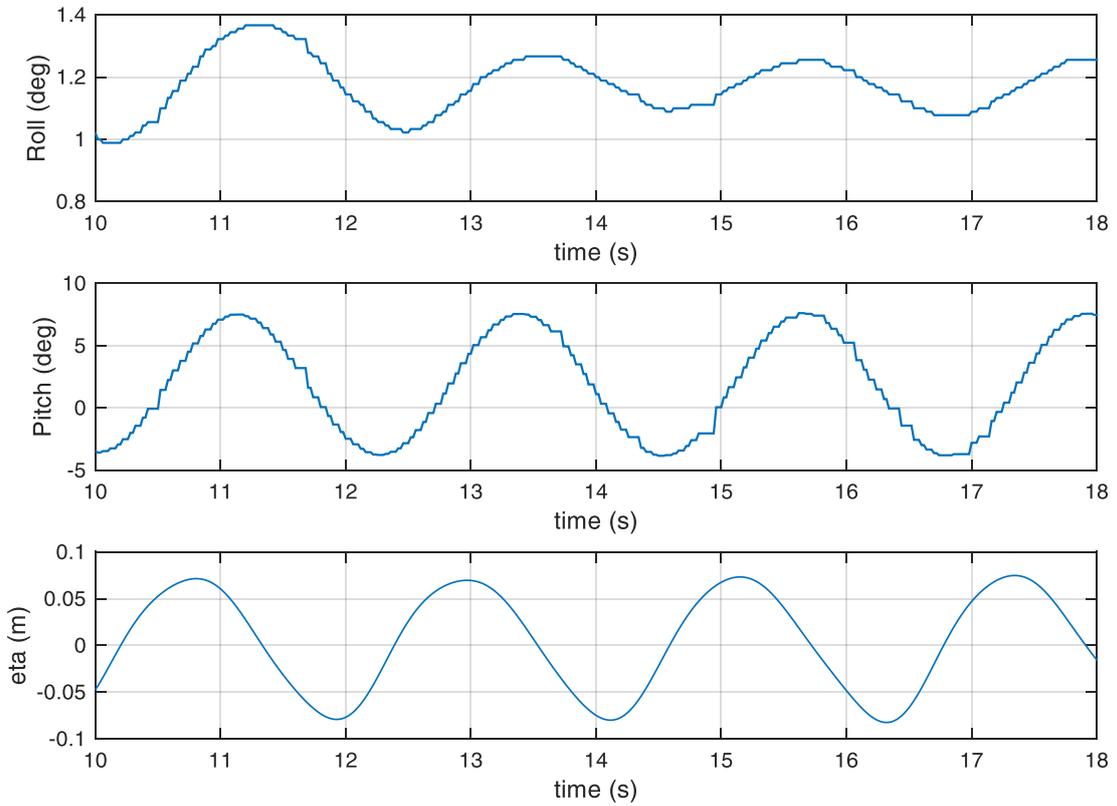
c073.mat



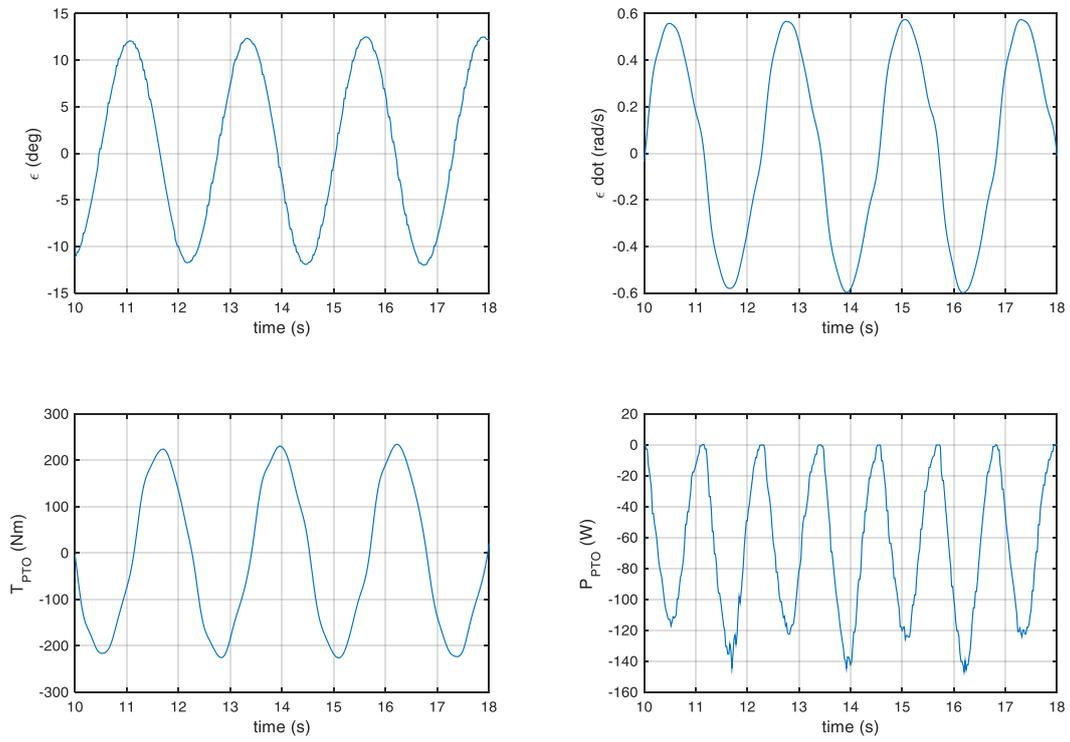
c074.mat



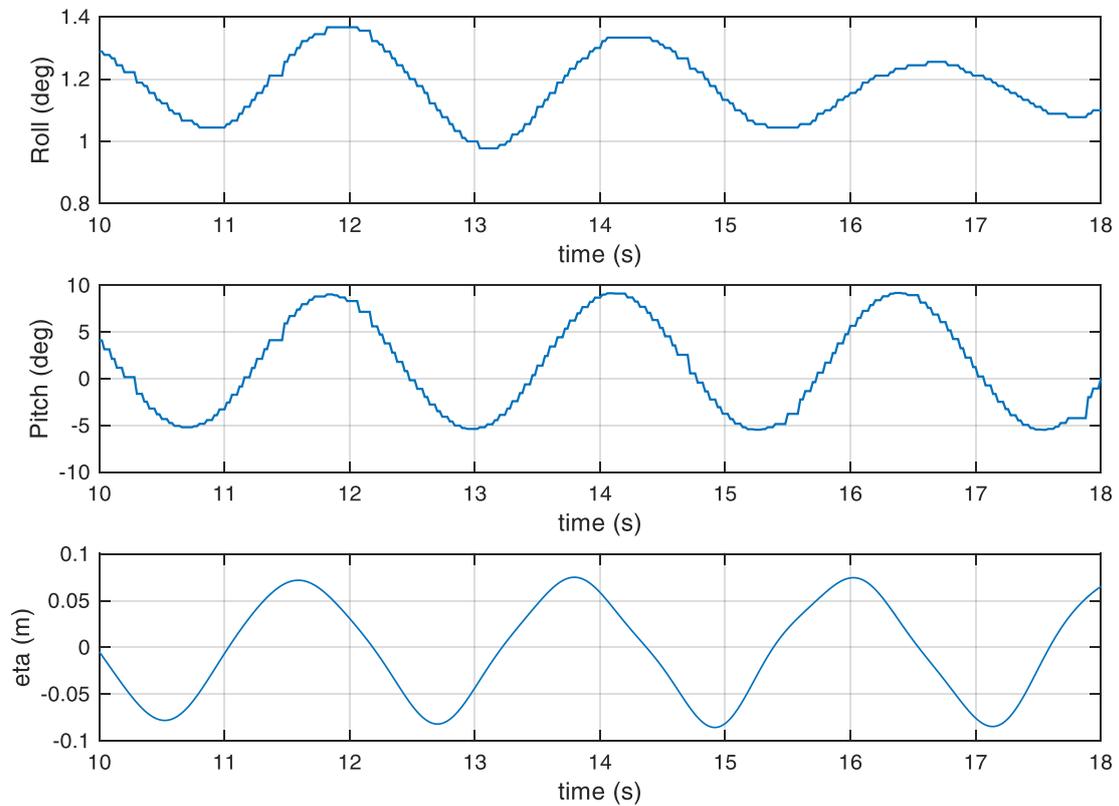
c074.mat



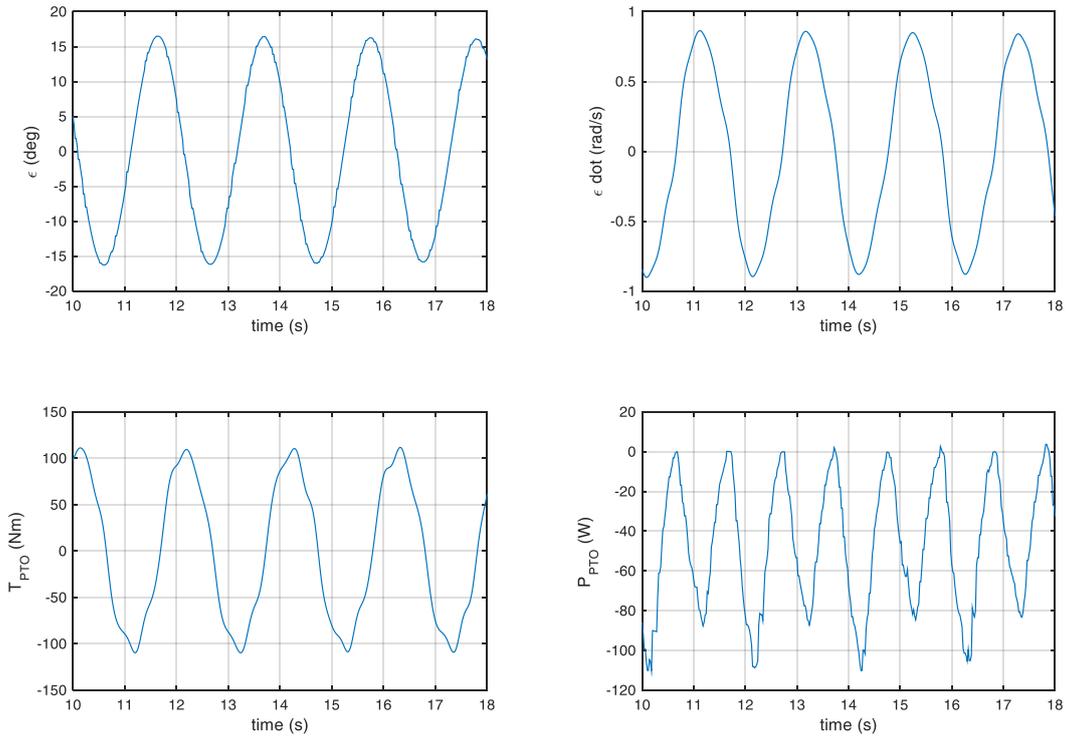
c075.mat



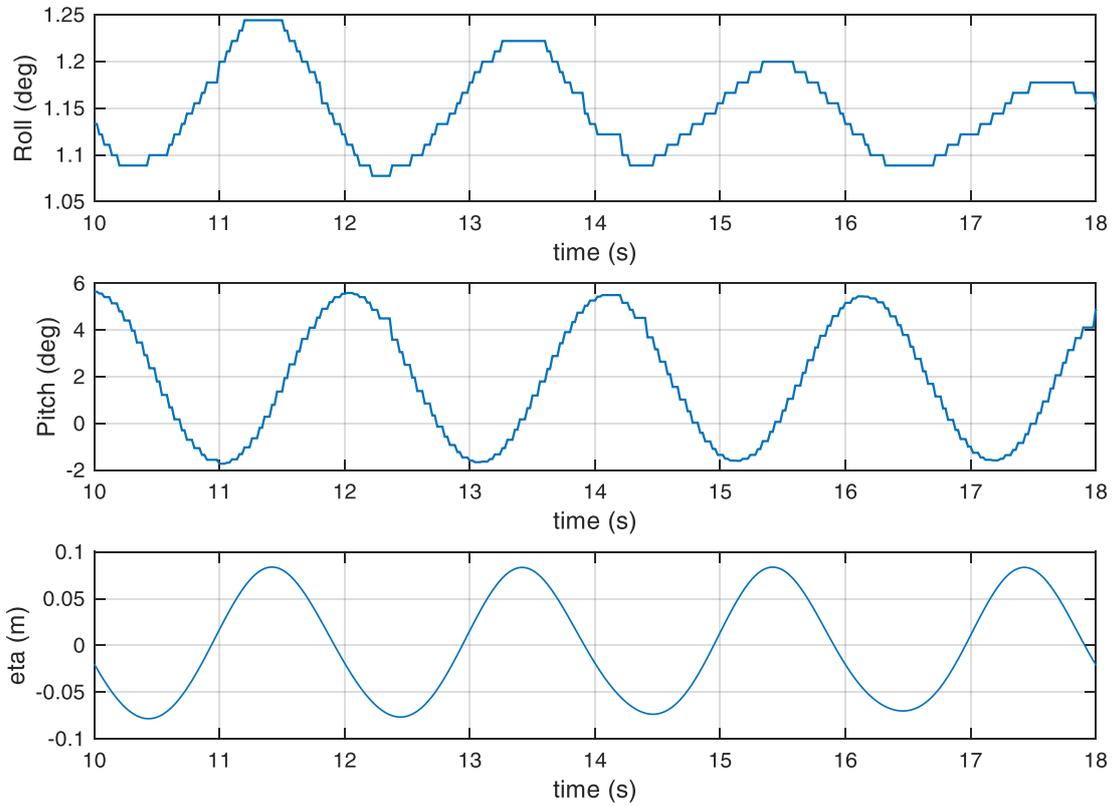
c075.mat



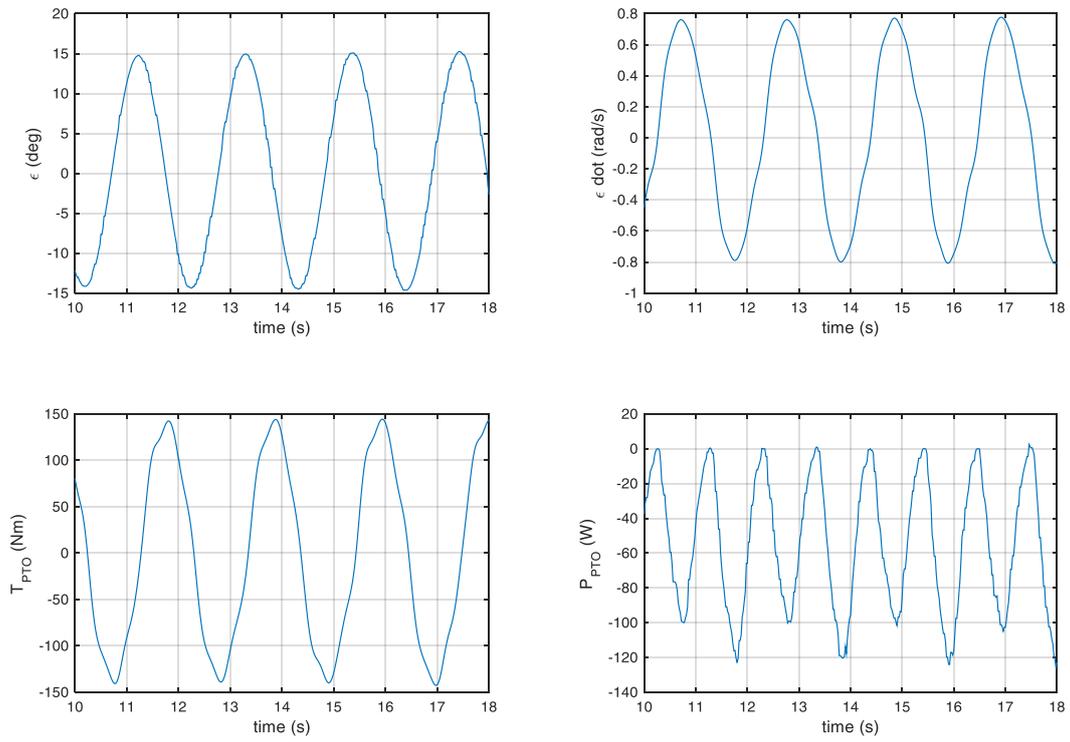
c076.mat



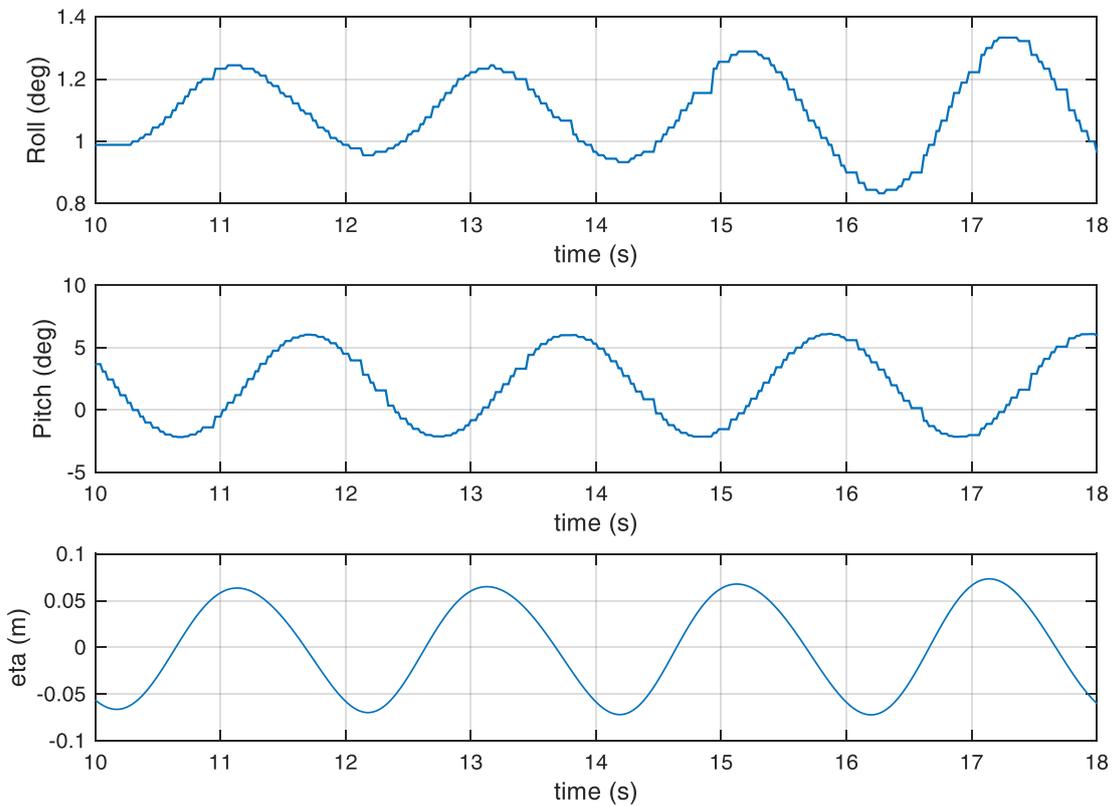
c076.mat



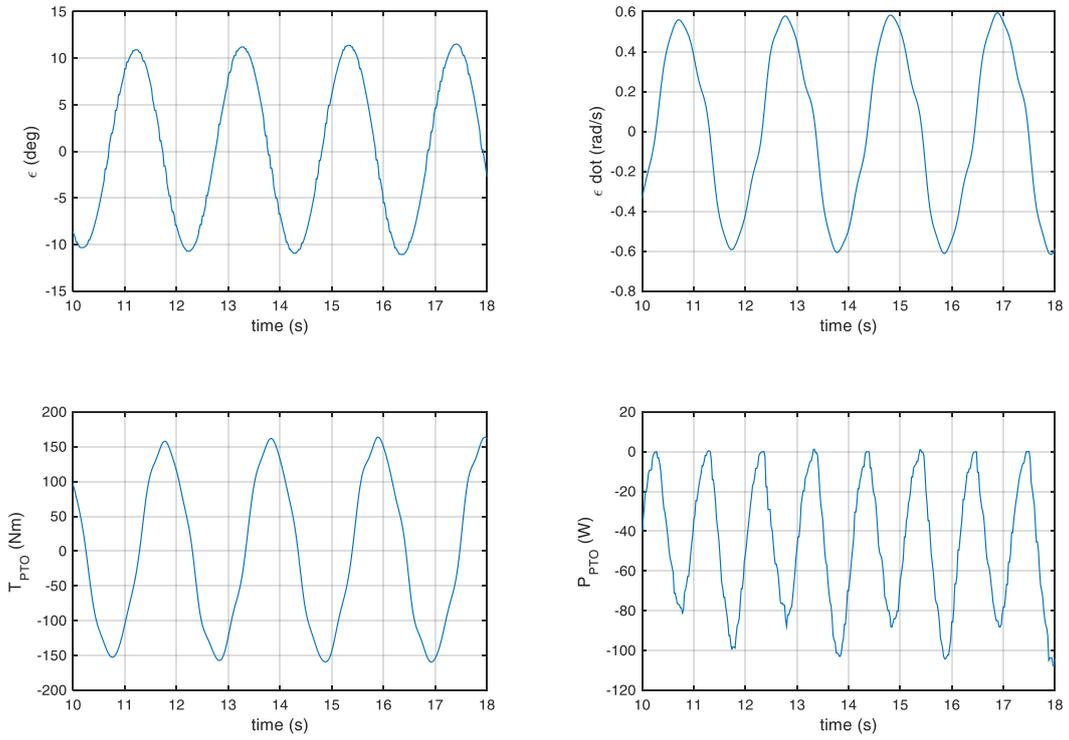
c077.mat



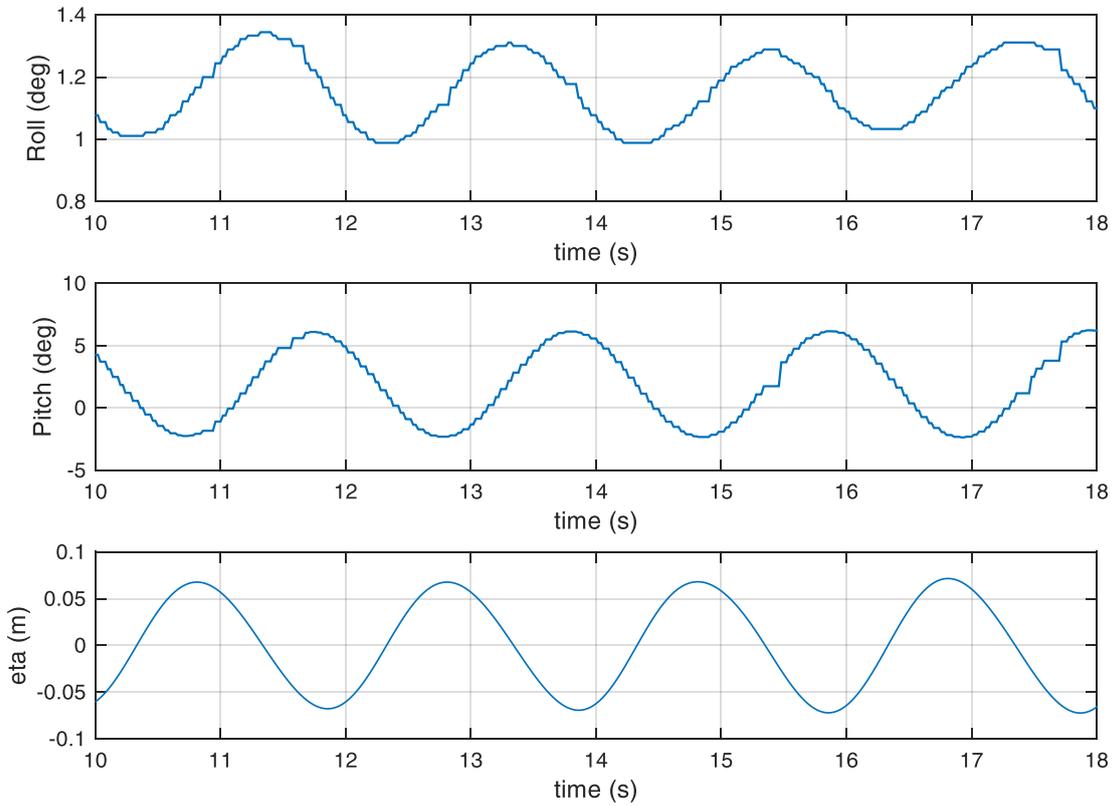
c077.mat



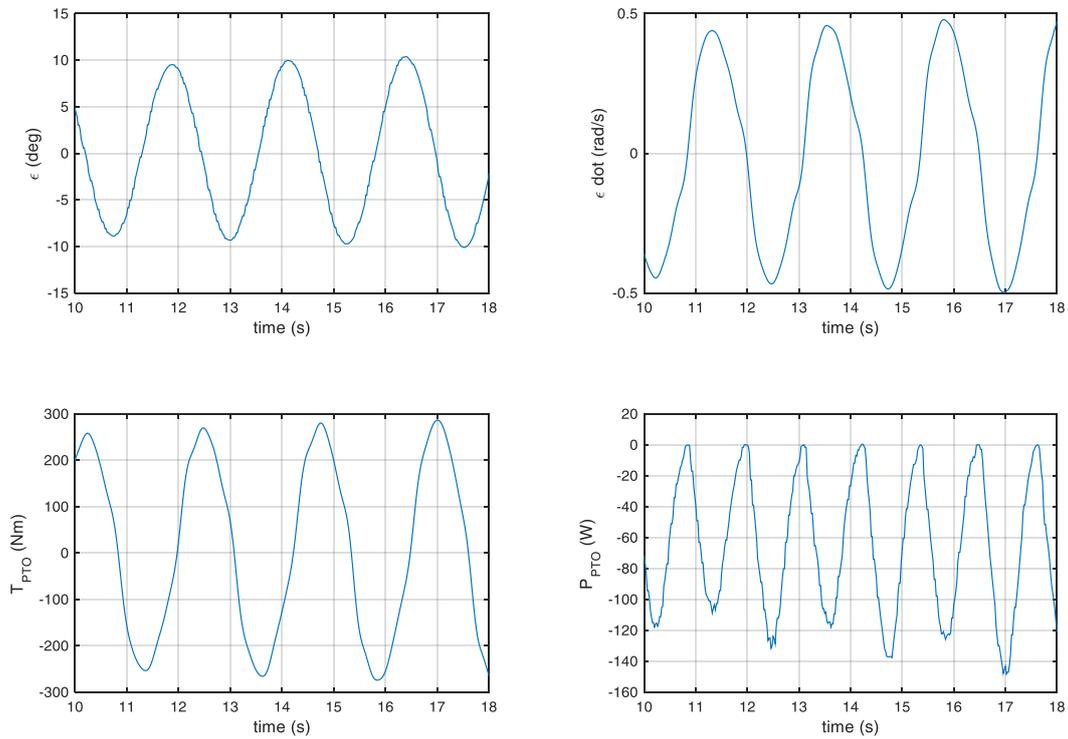
c078.mat



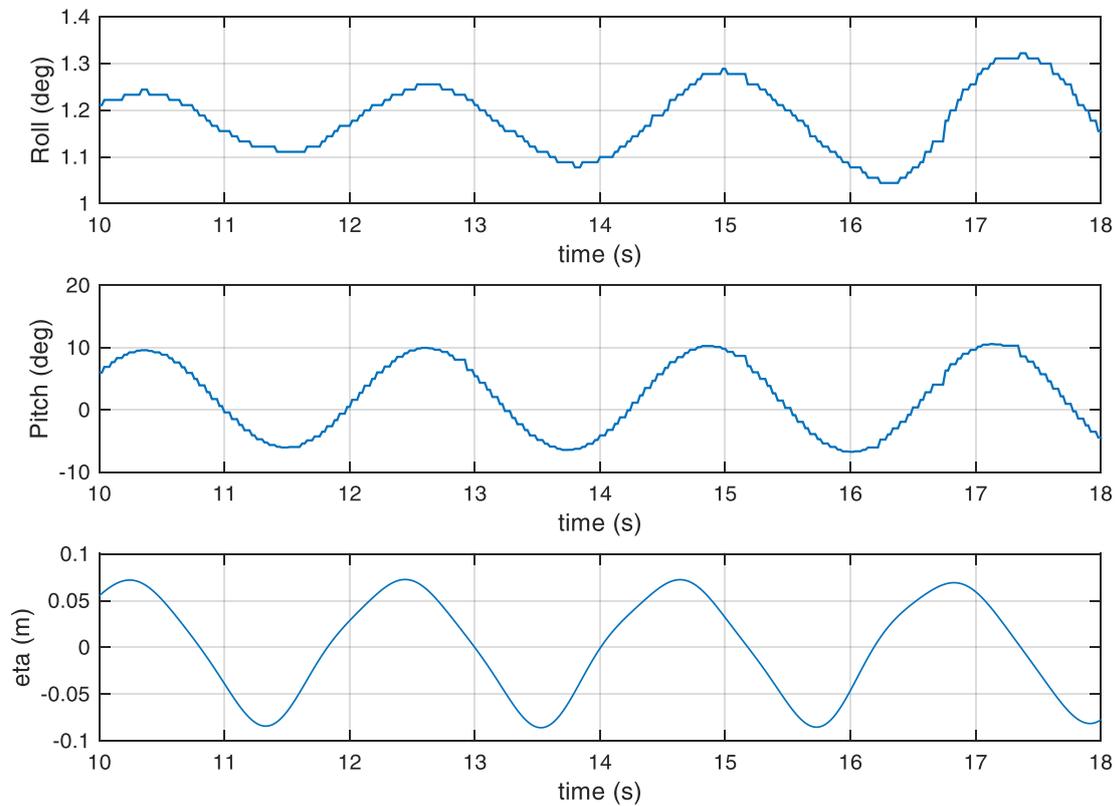
c078.mat



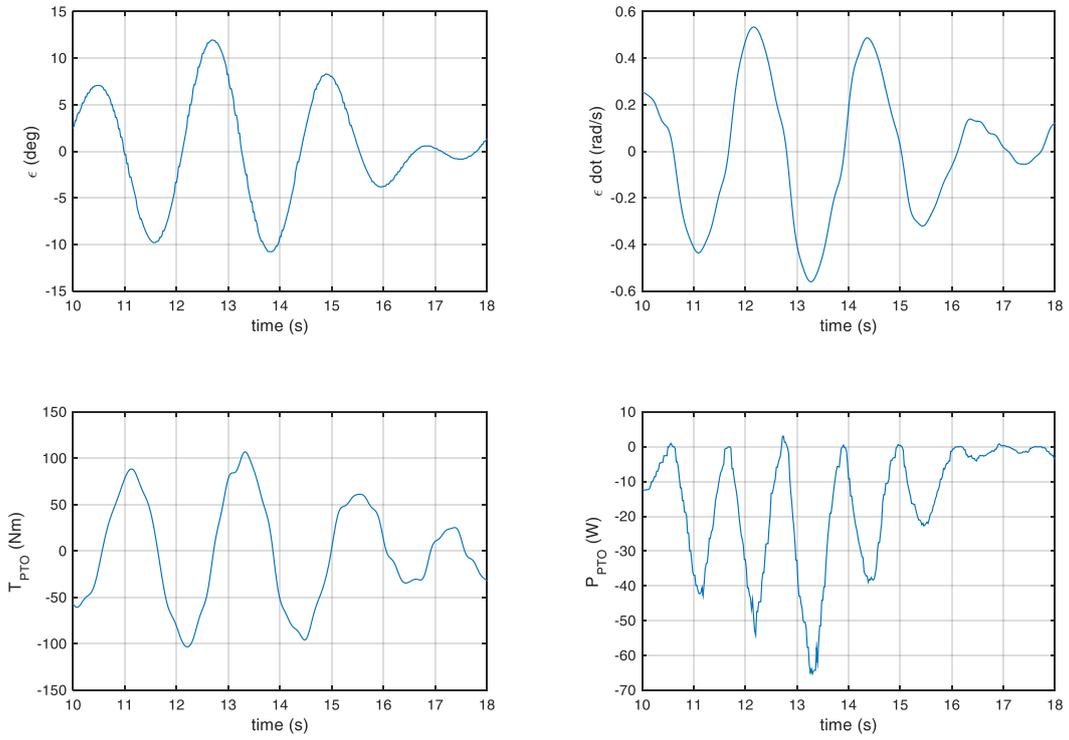
c079.mat



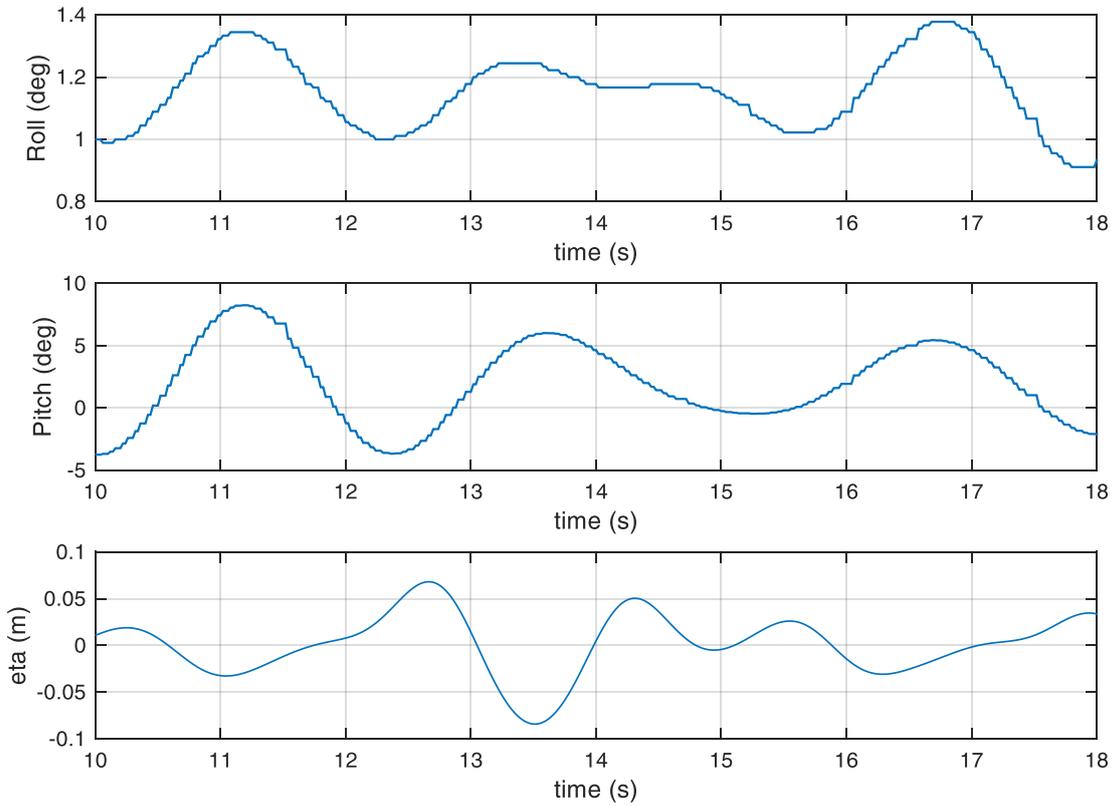
c079.mat



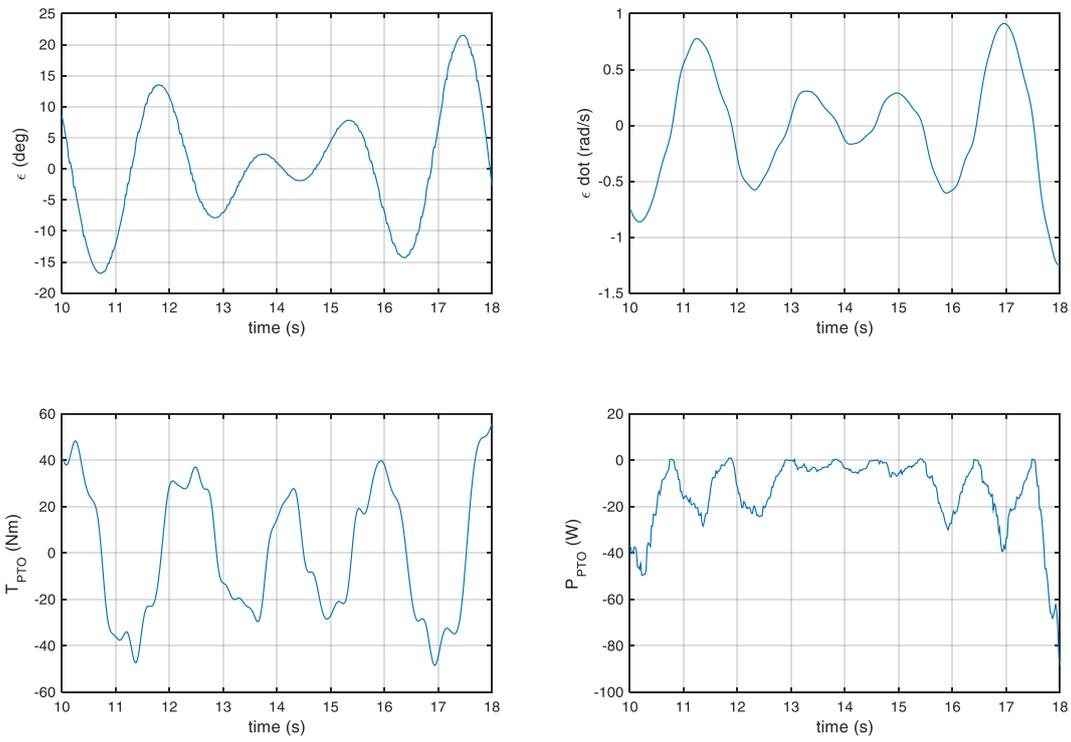
c080.mat



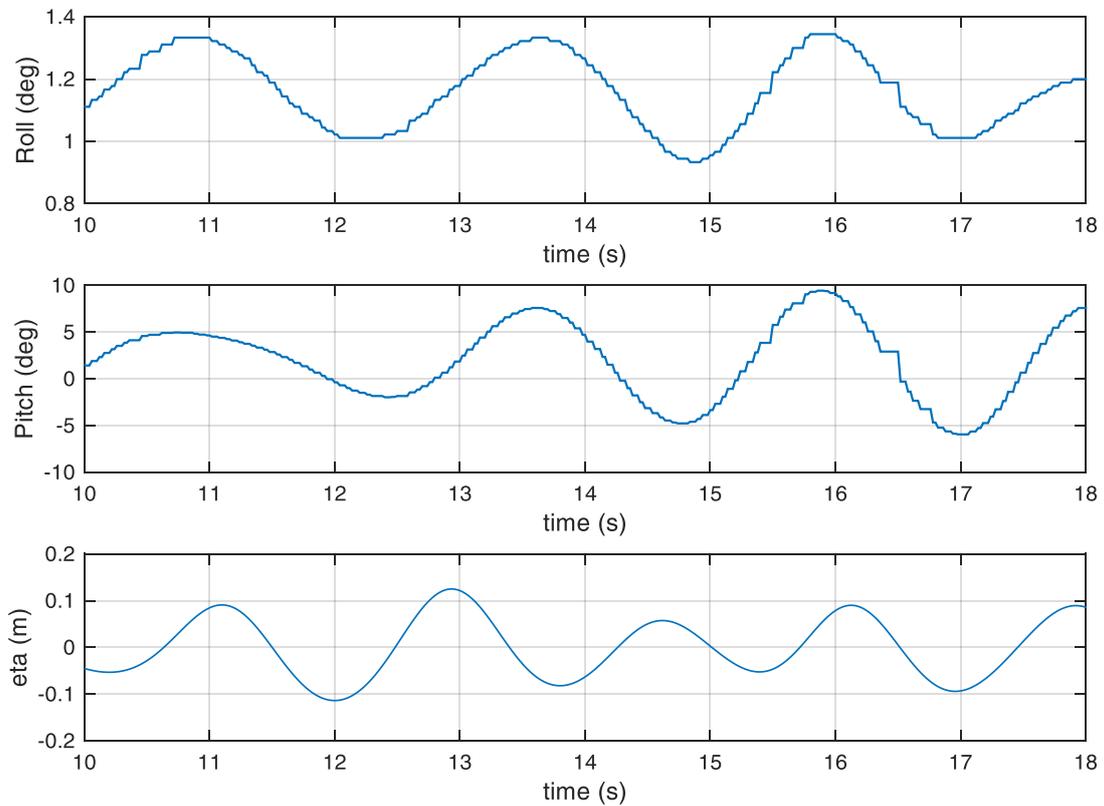
c080.mat



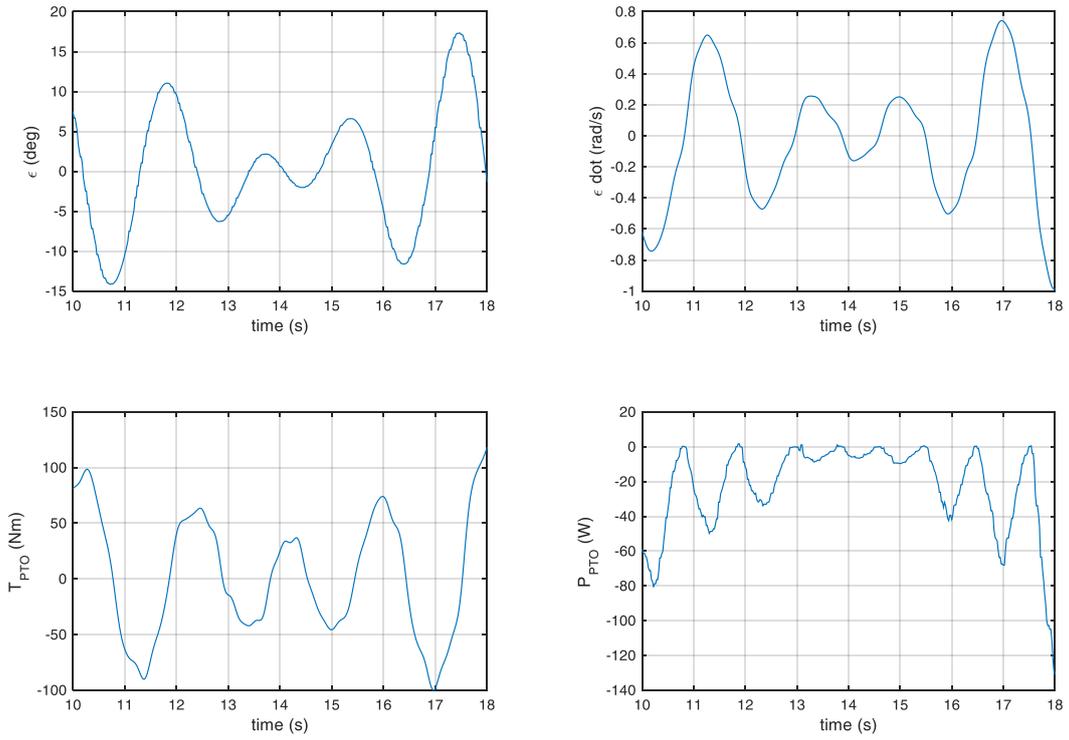
c081.mat



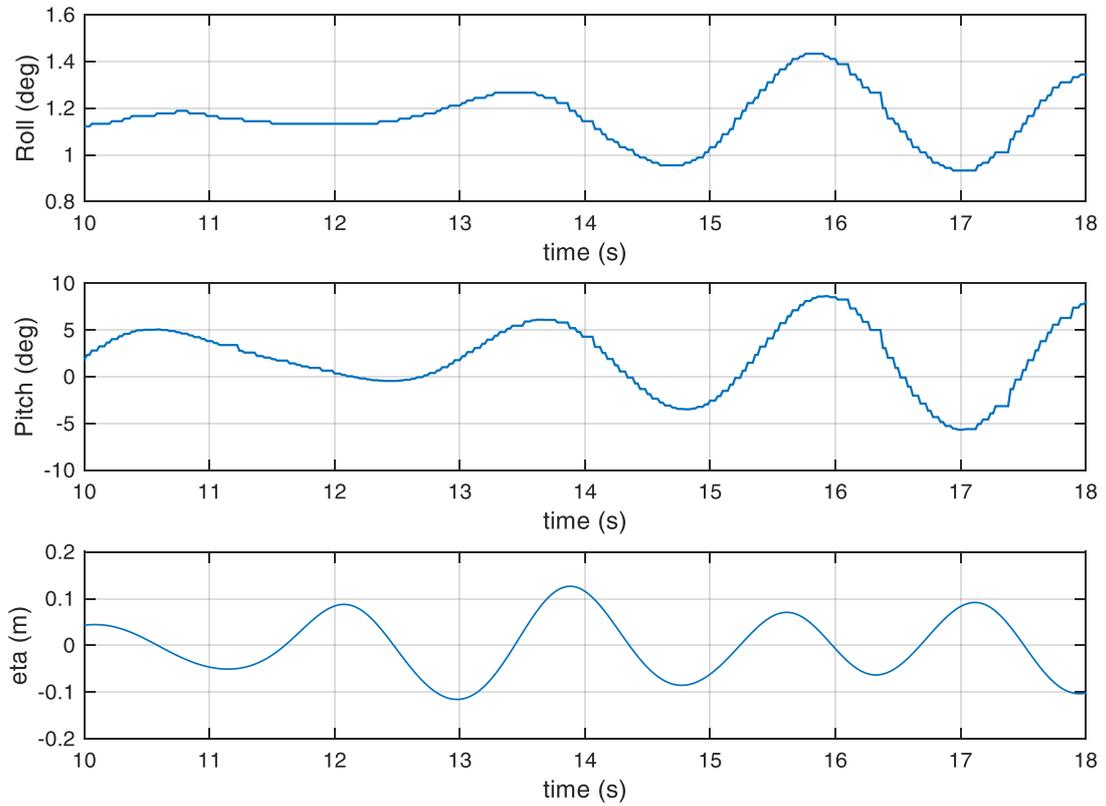
c081.mat



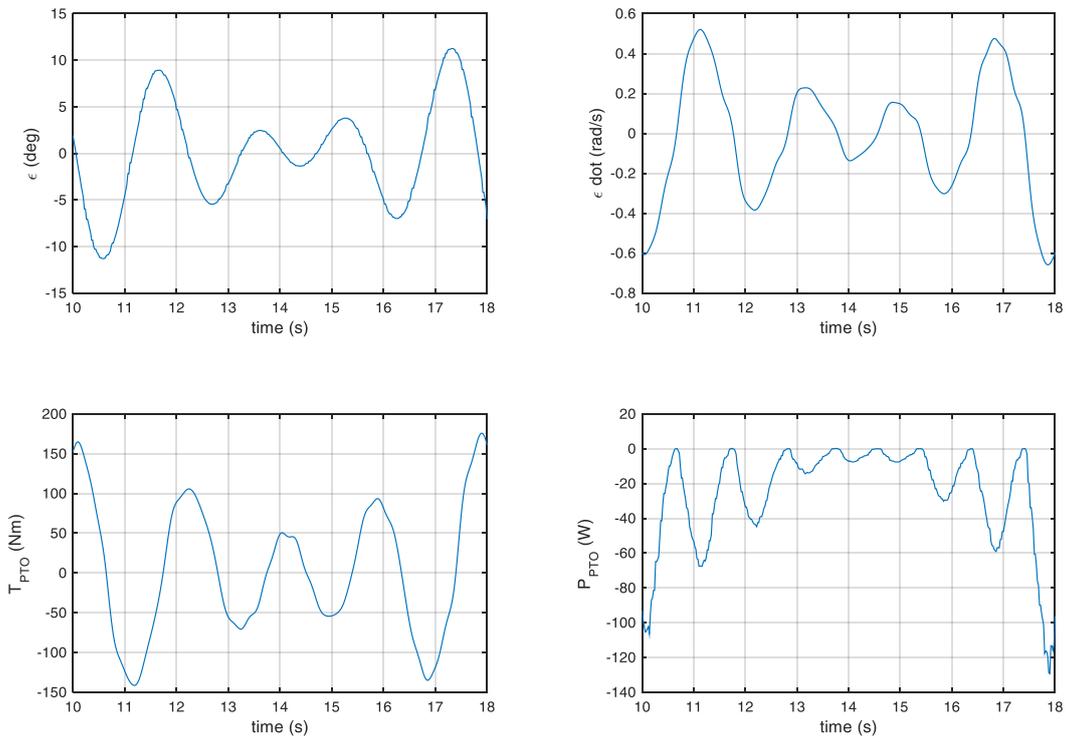
c082.mat



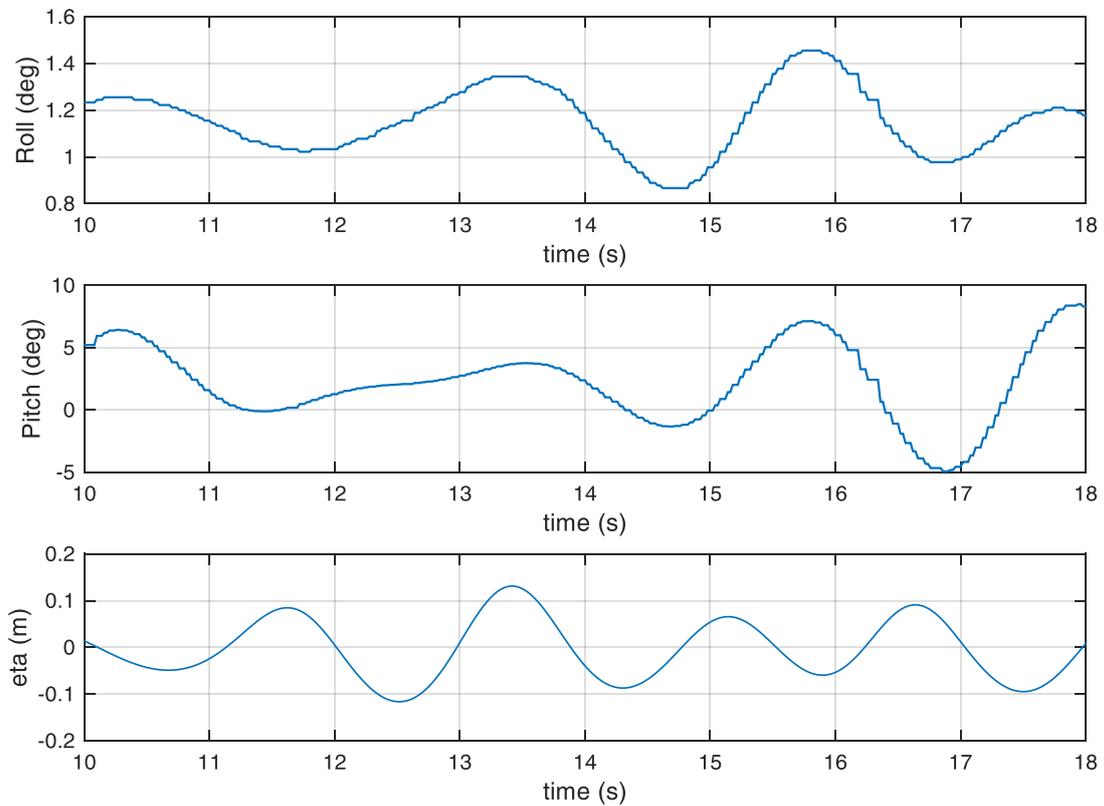
c082.mat



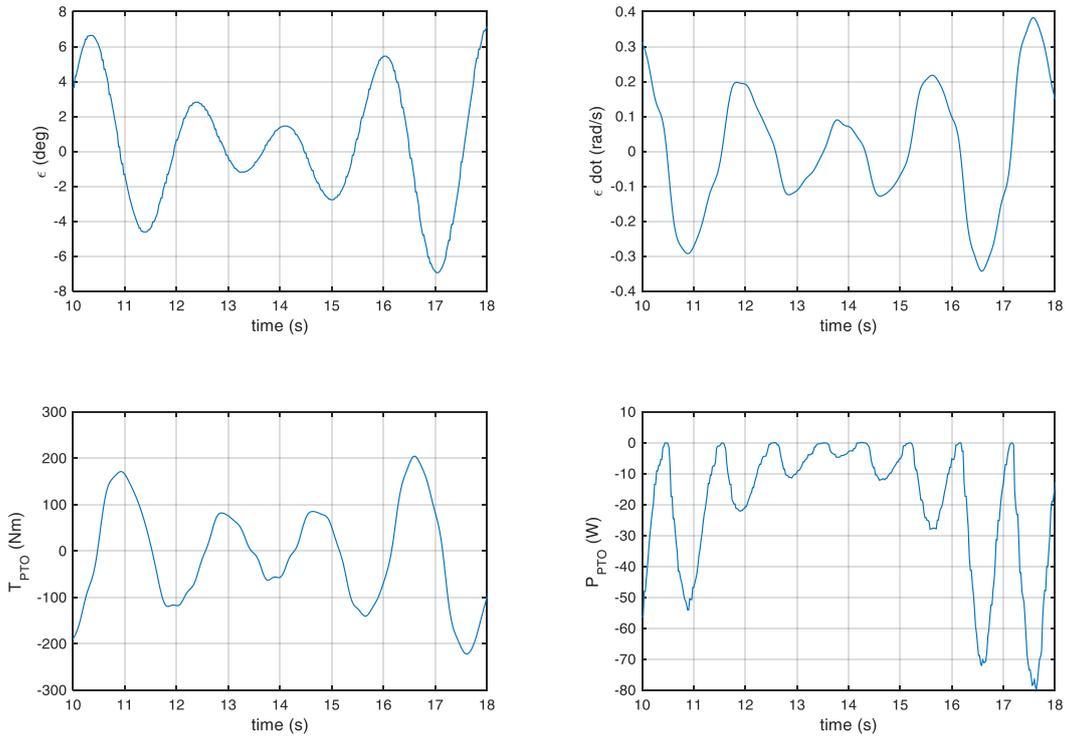
c083.mat



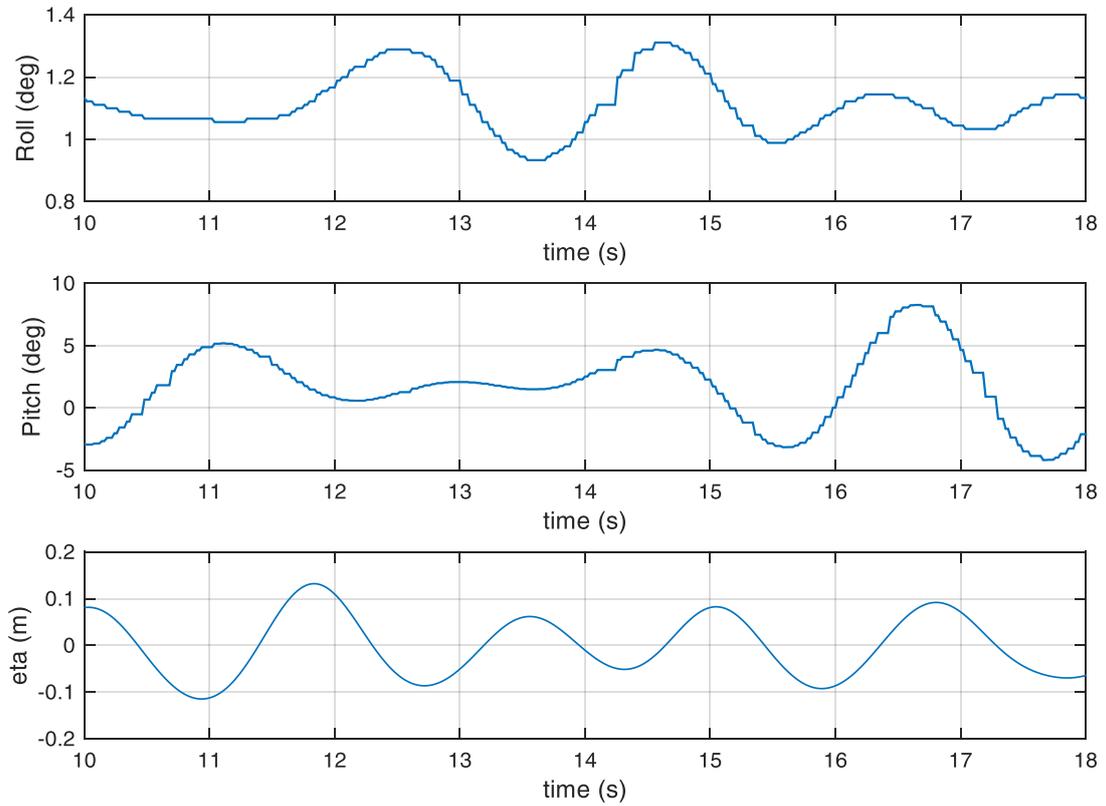
c083.mat



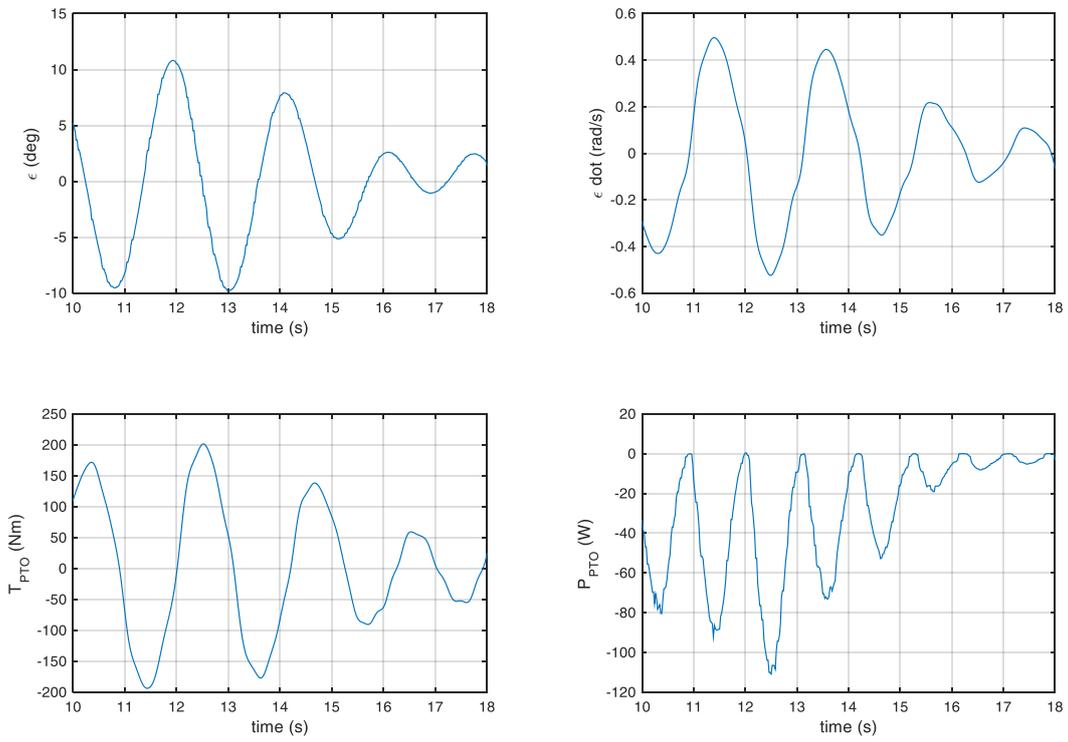
c084.mat



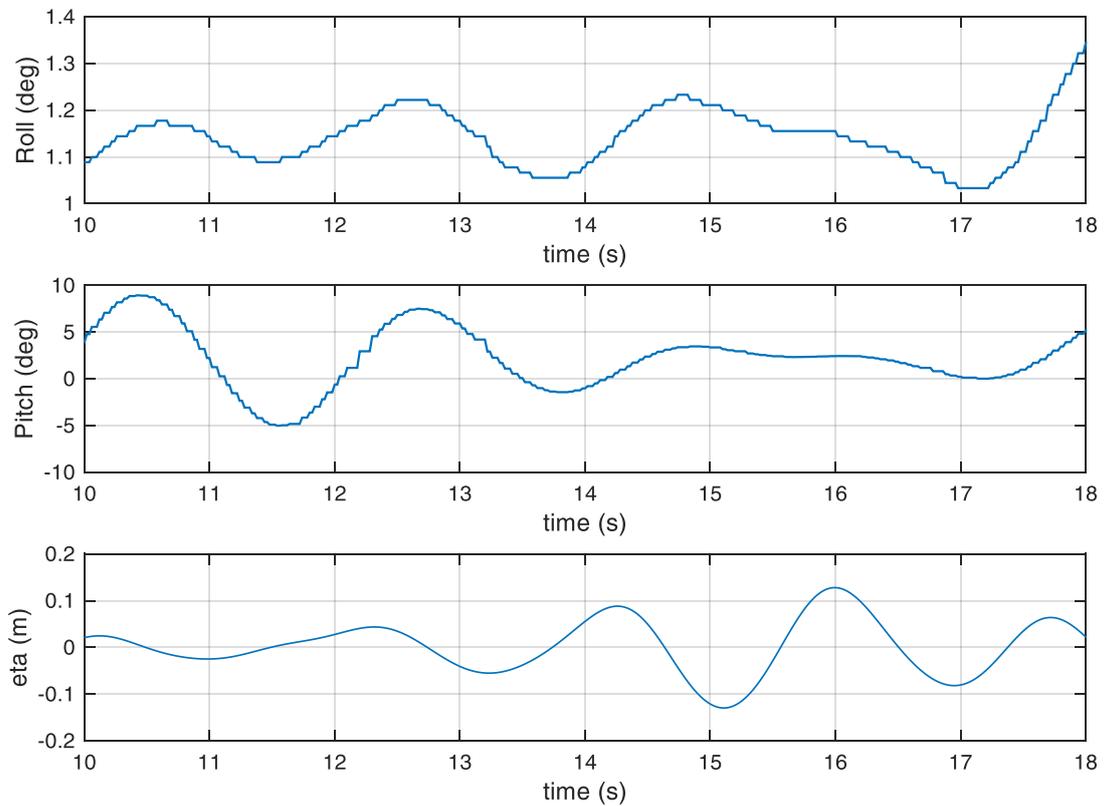
c084.mat



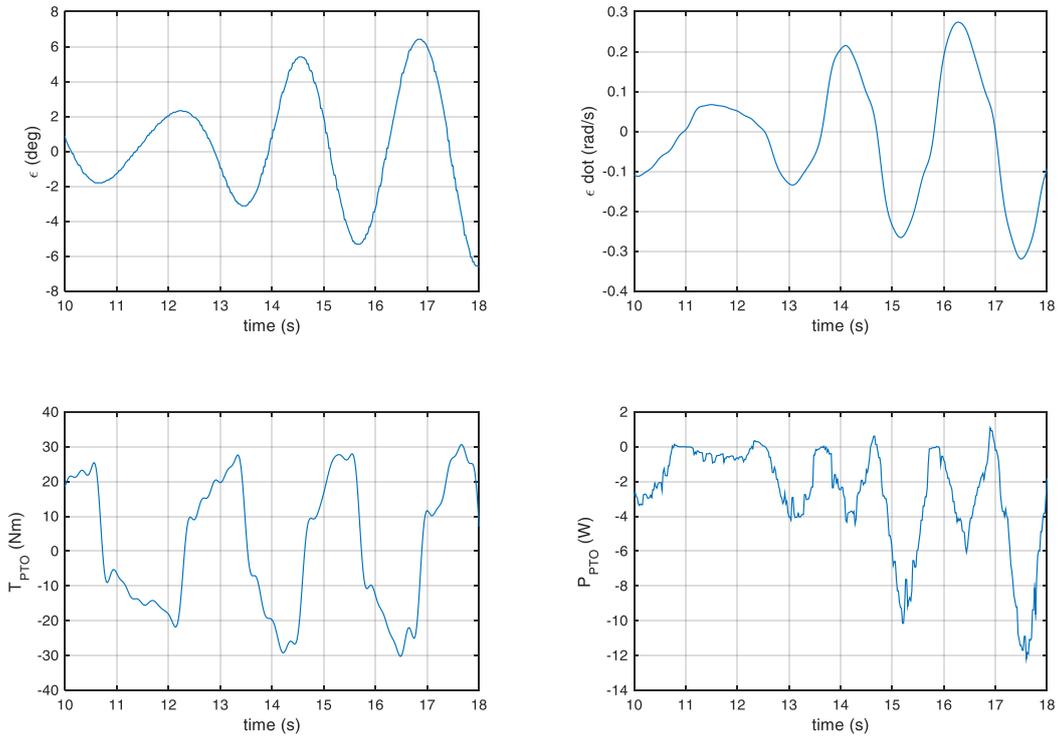
c085.mat



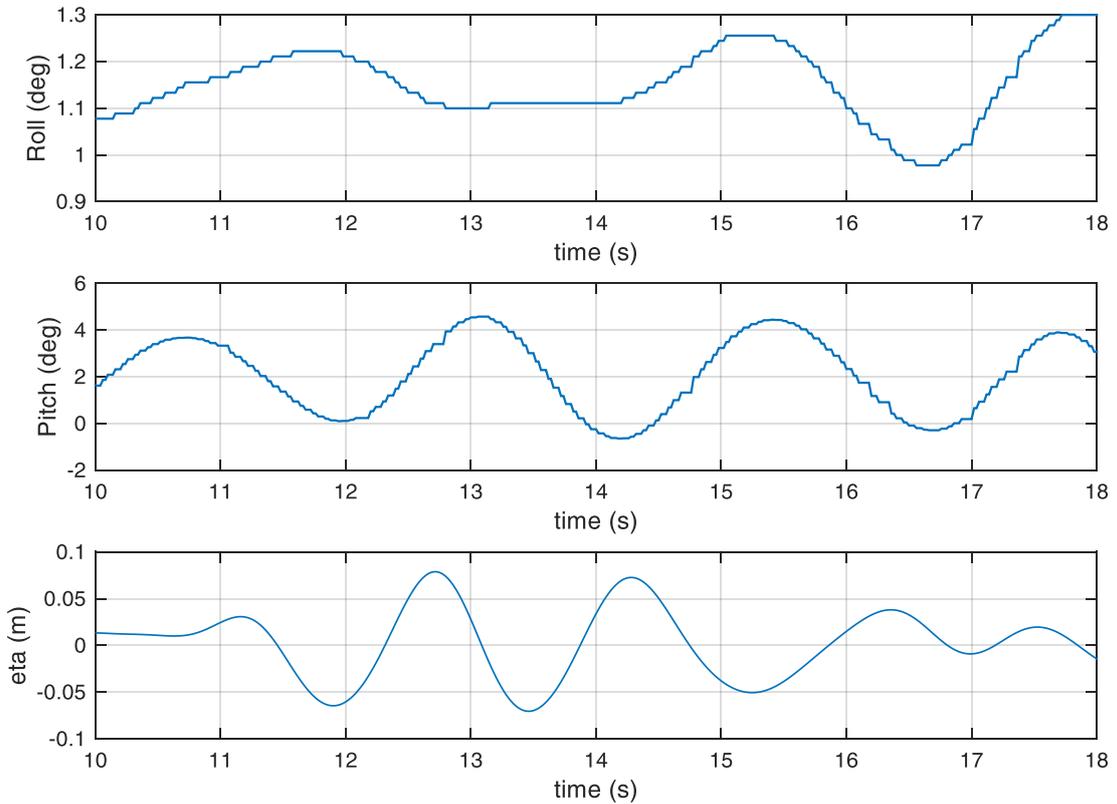
c085.mat



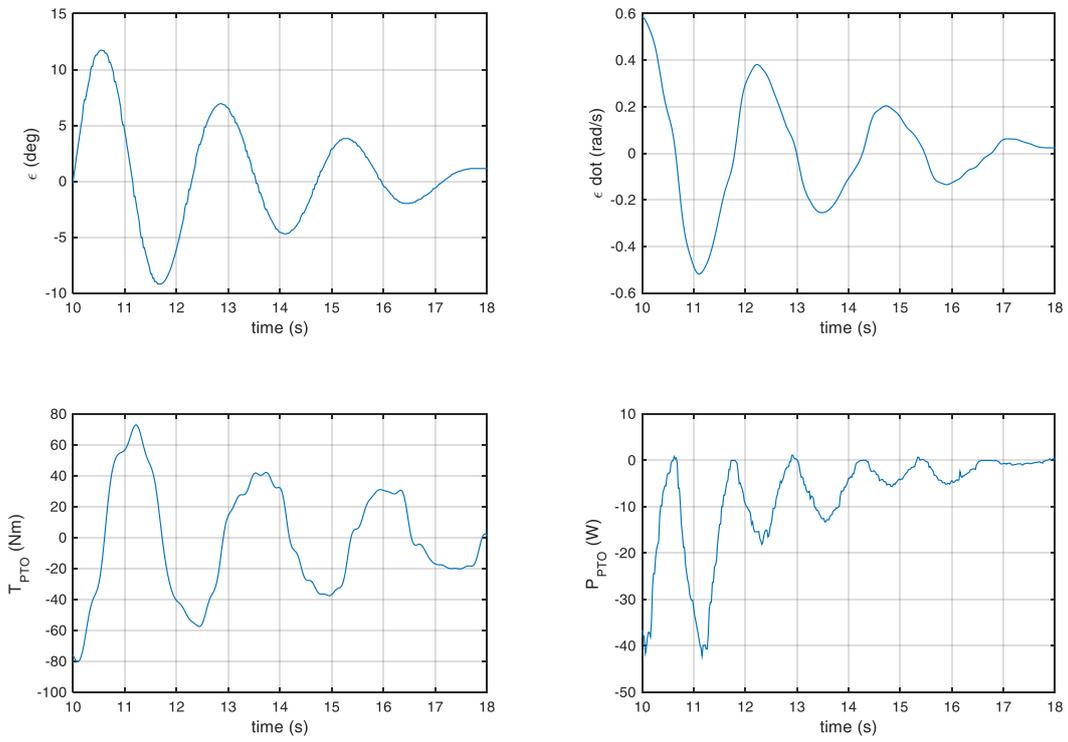
c086.mat



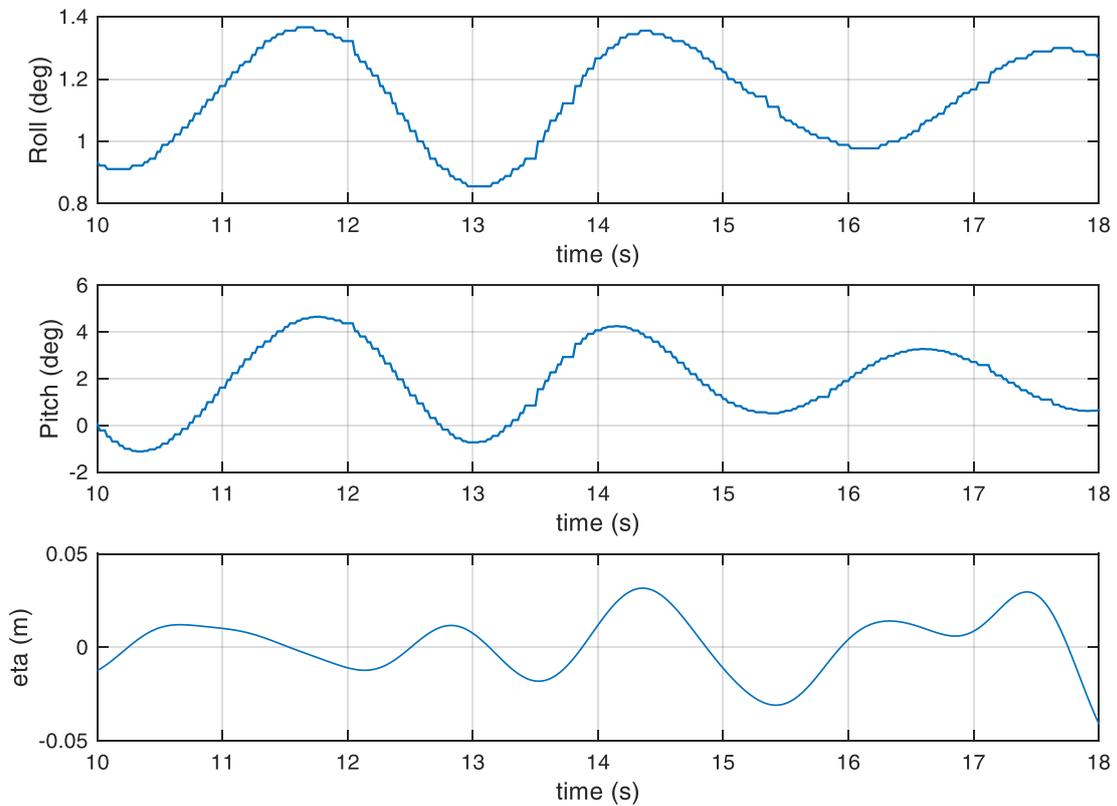
c086.mat



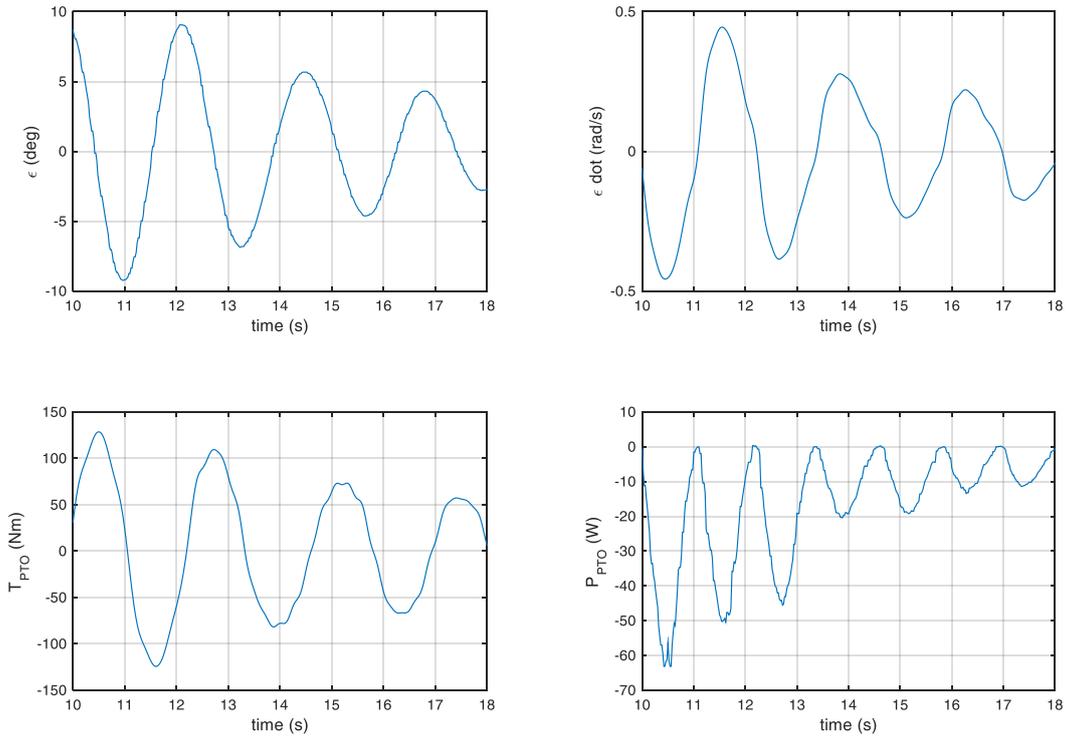
c087.mat



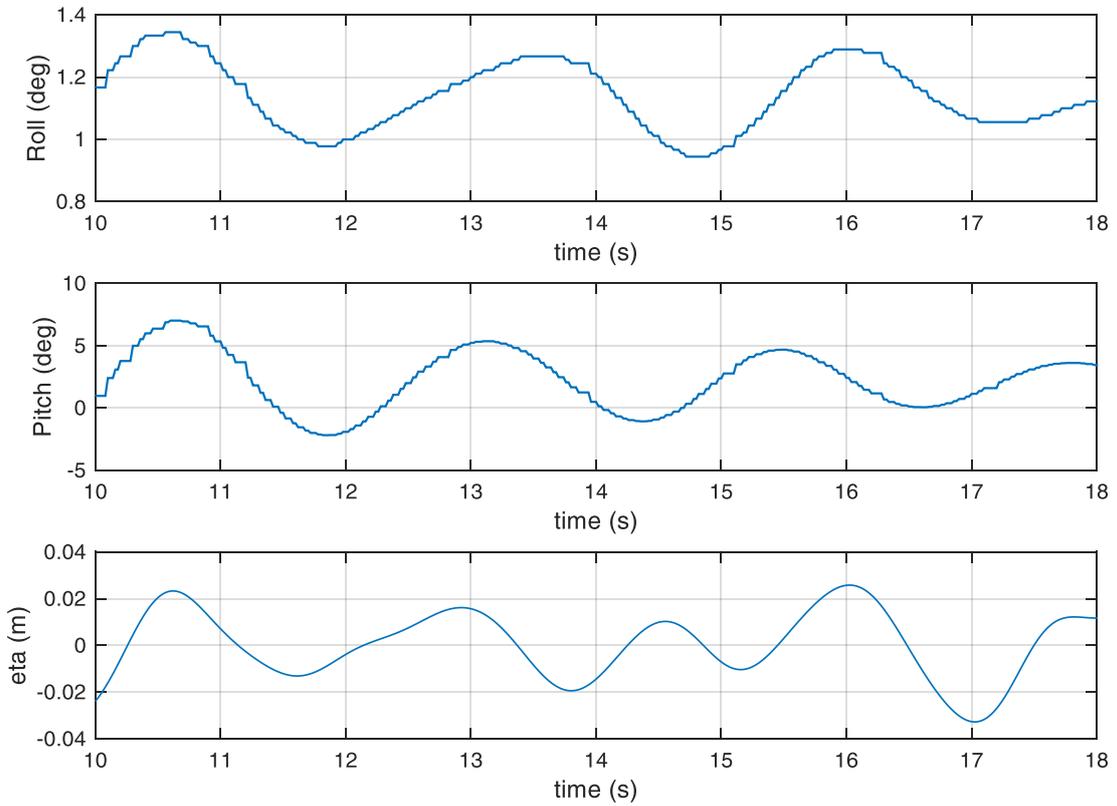
c087.mat



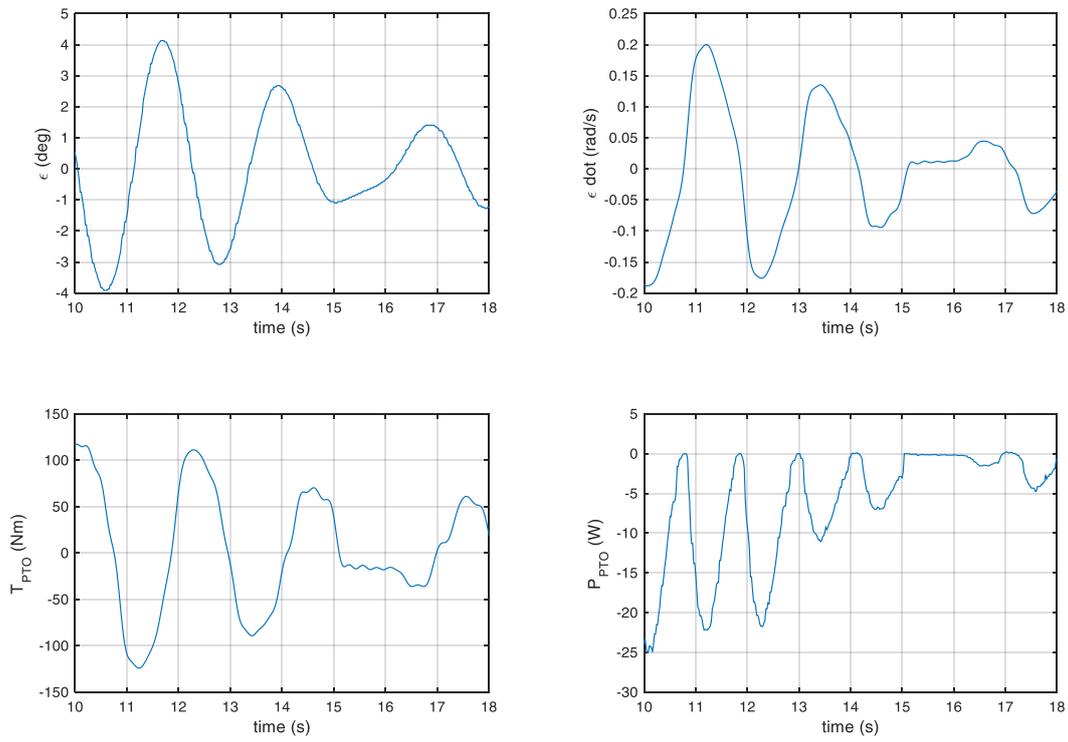
c088.mat



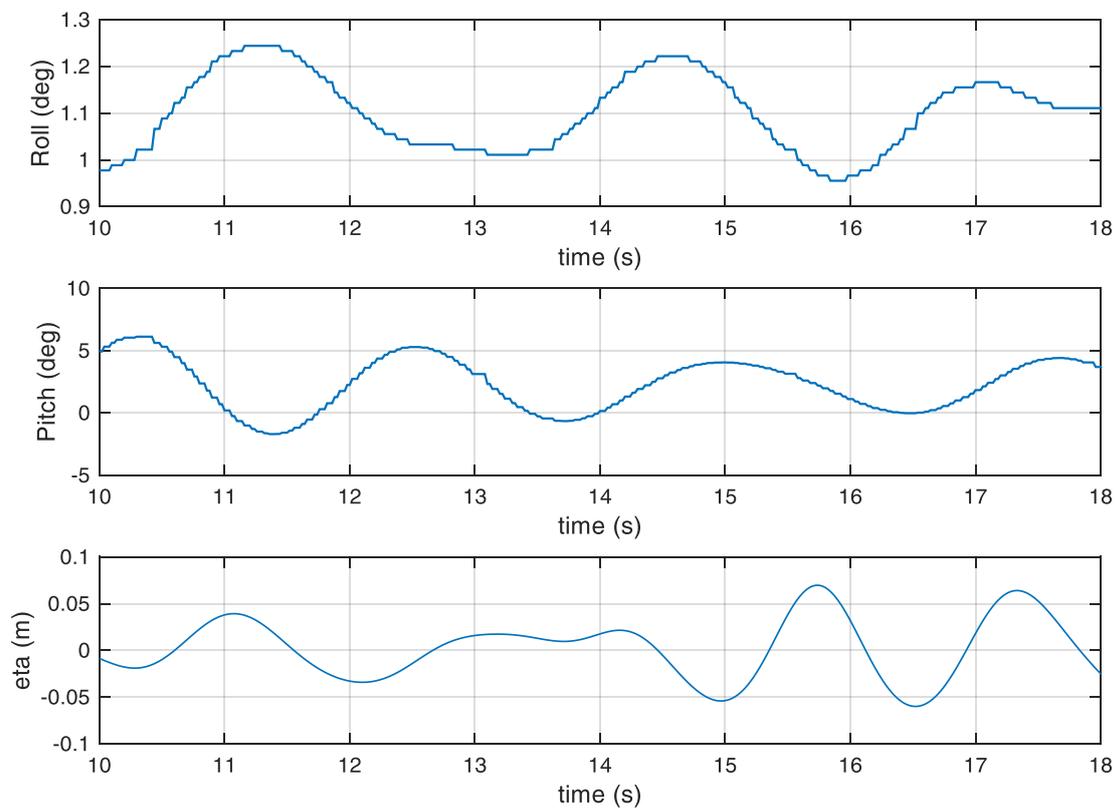
c088.mat



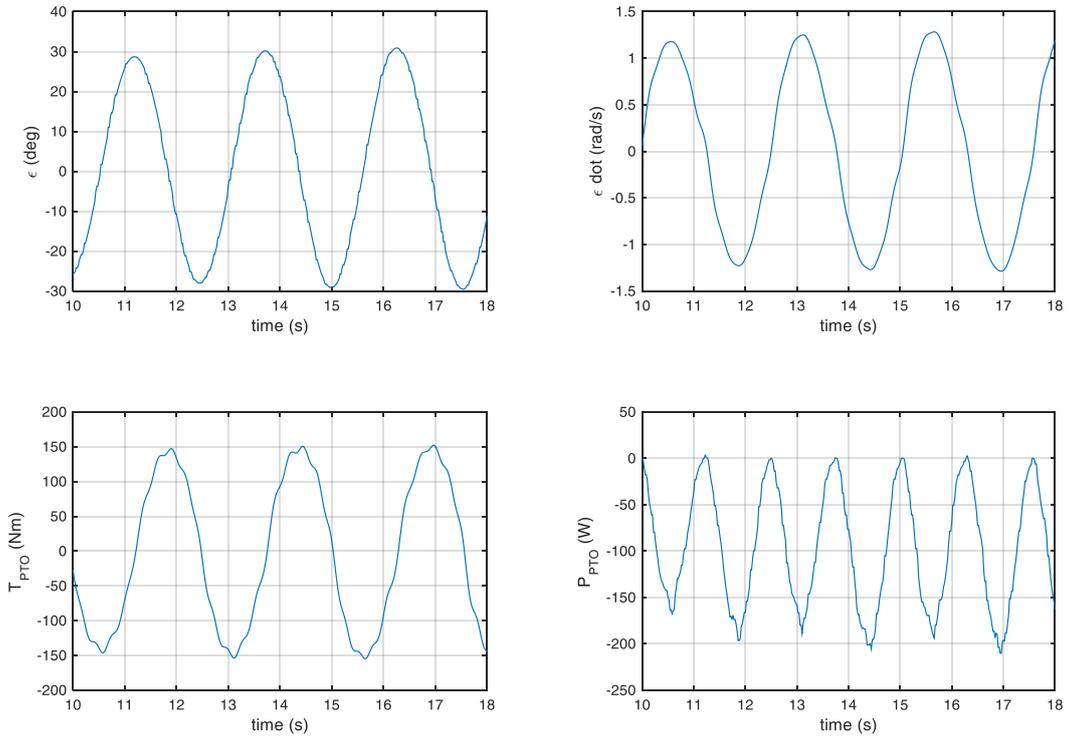
c089.mat



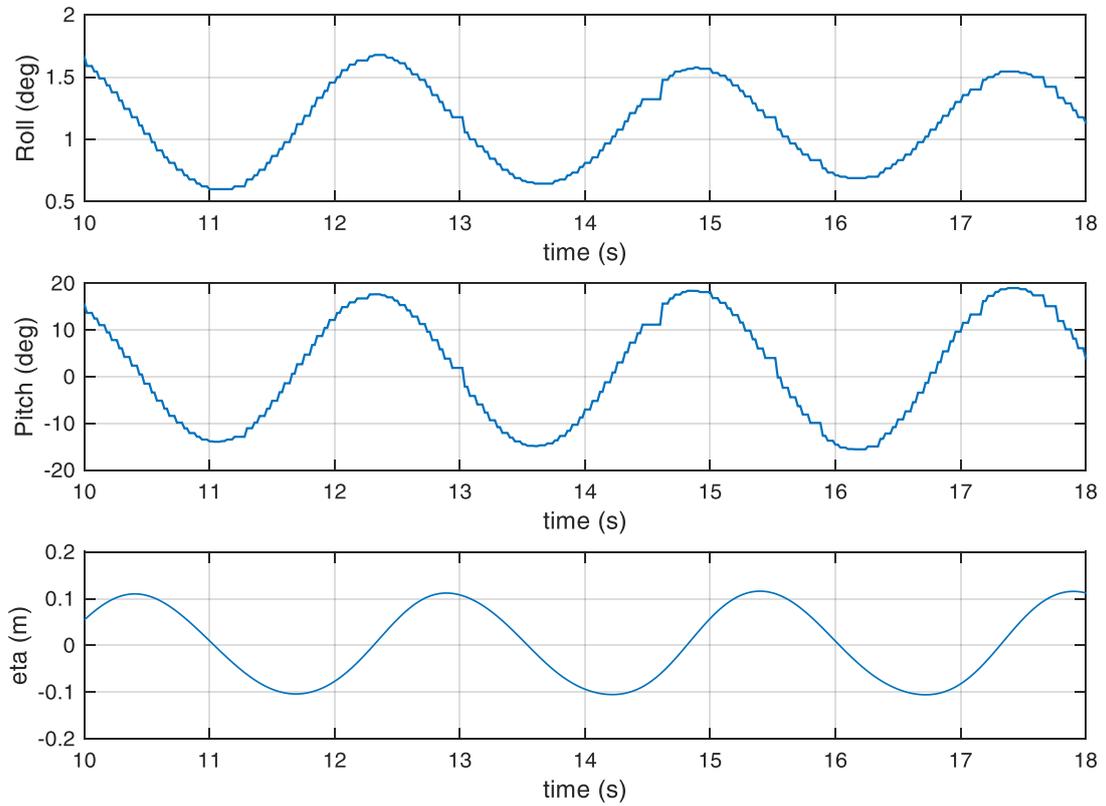
c089.mat



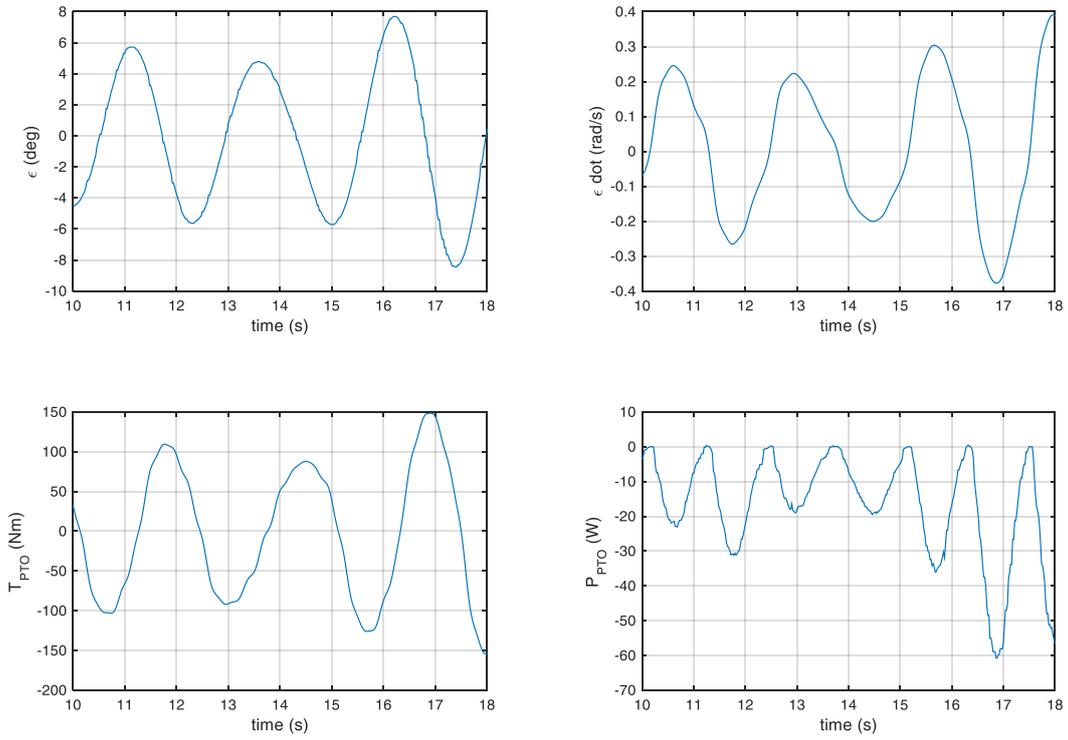
c090.mat



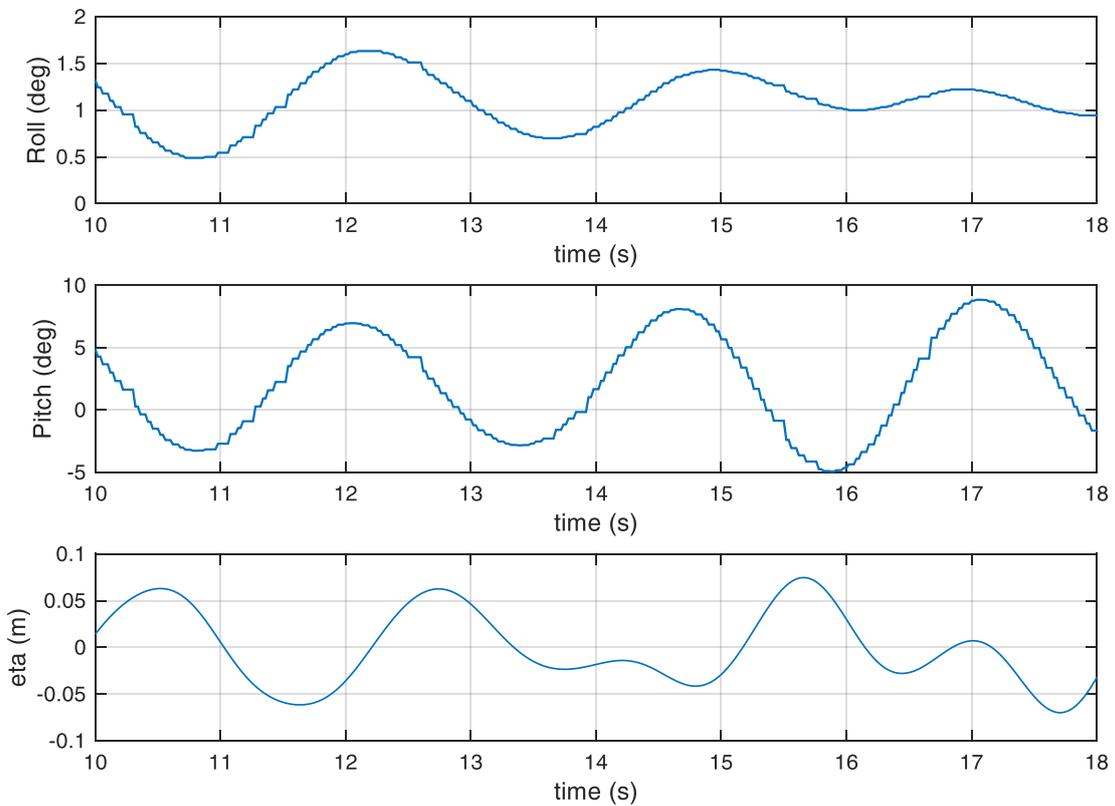
c090.mat



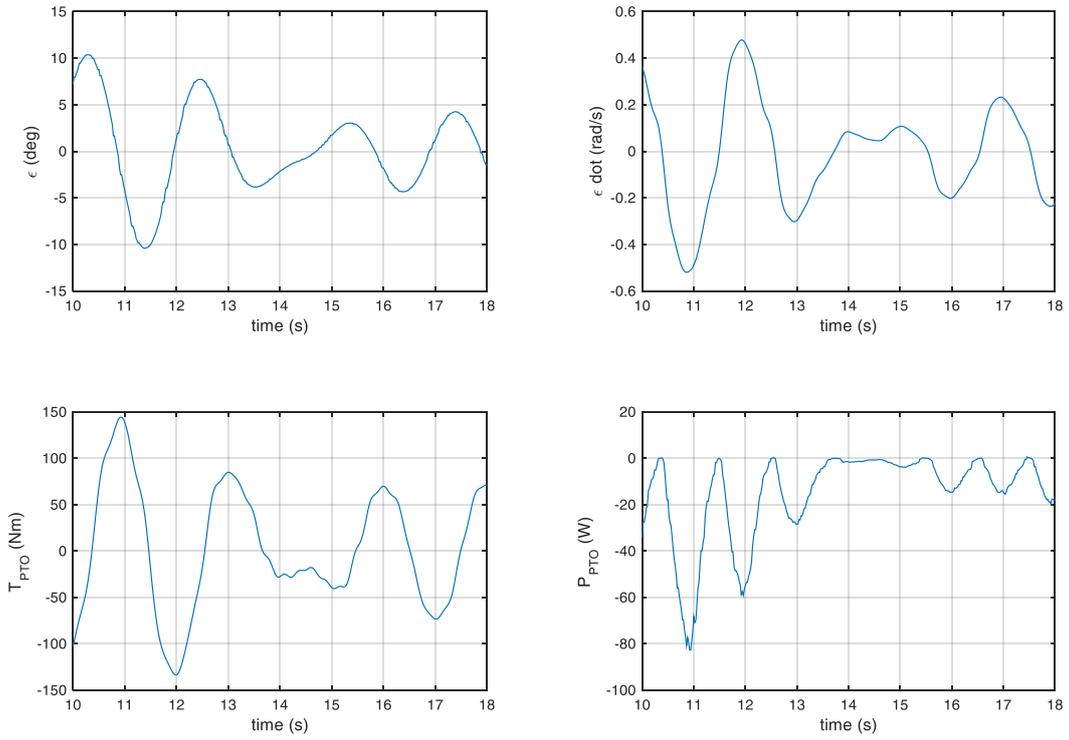
c091.mat



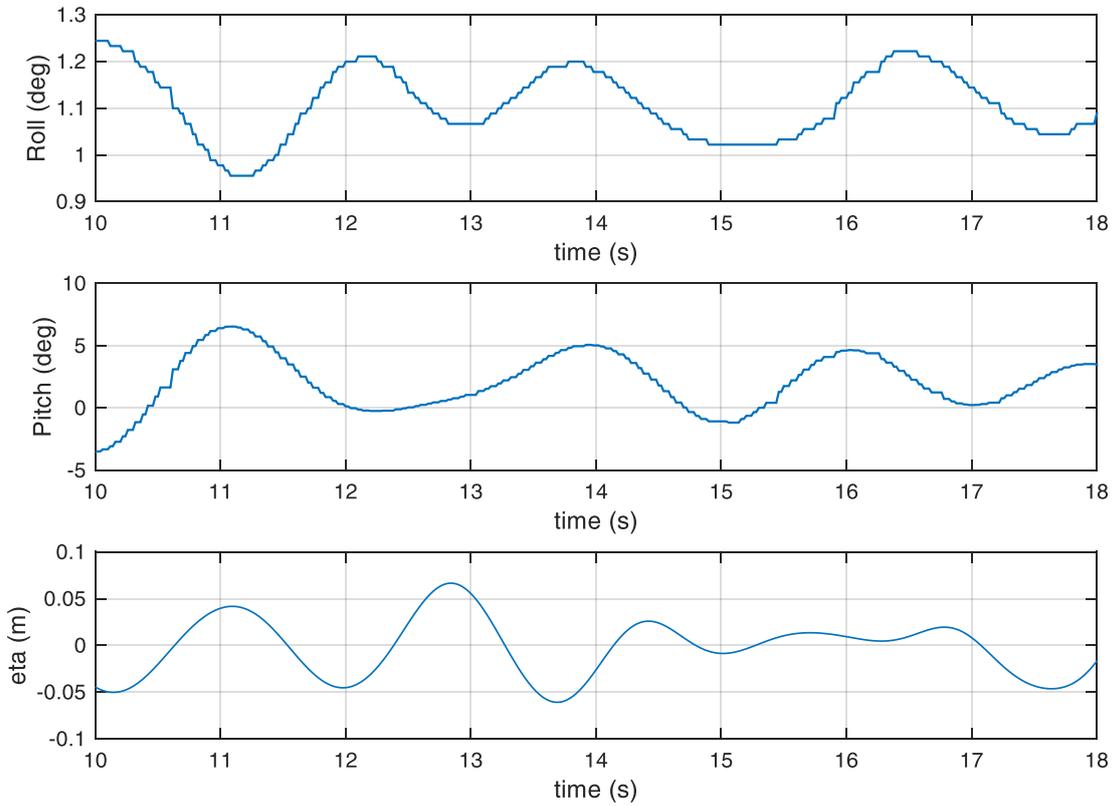
c091.mat



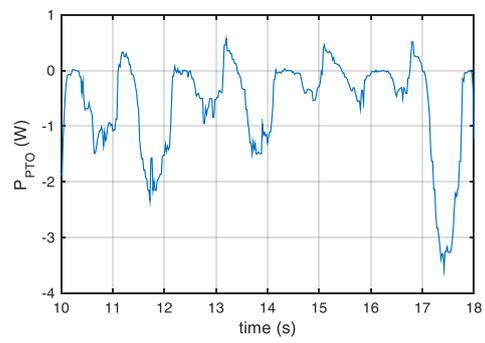
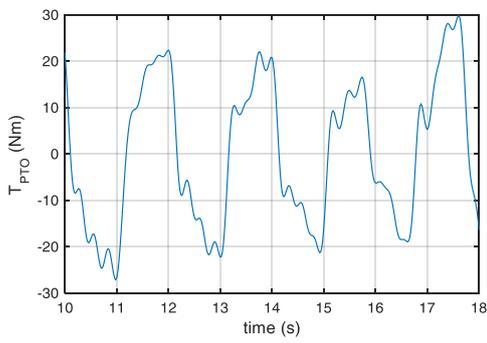
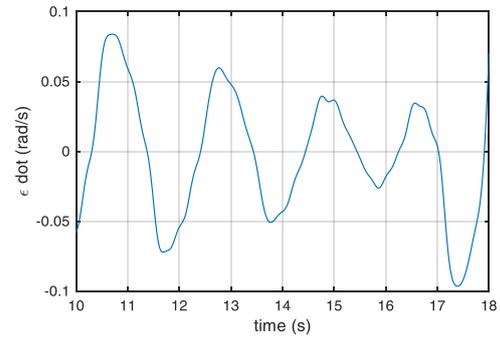
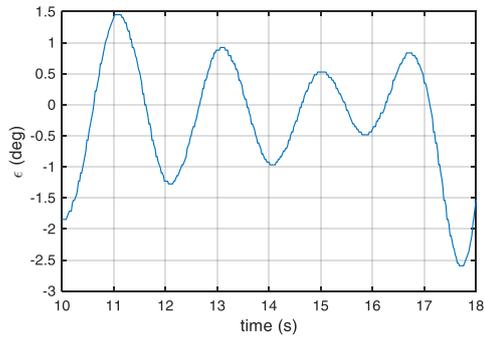
c092.mat



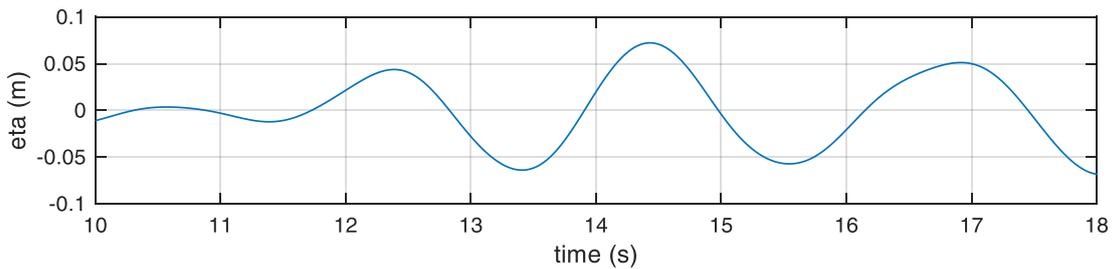
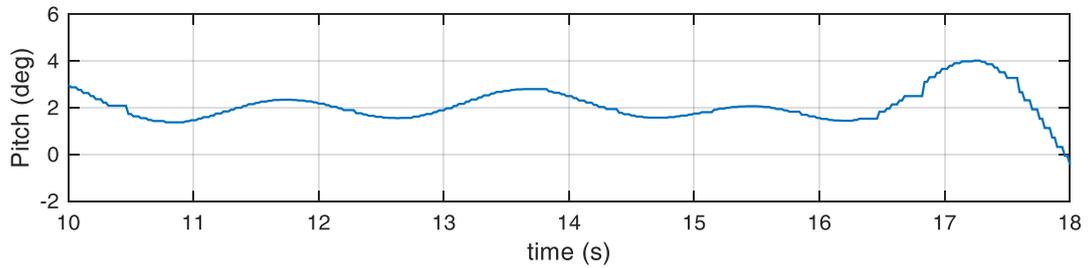
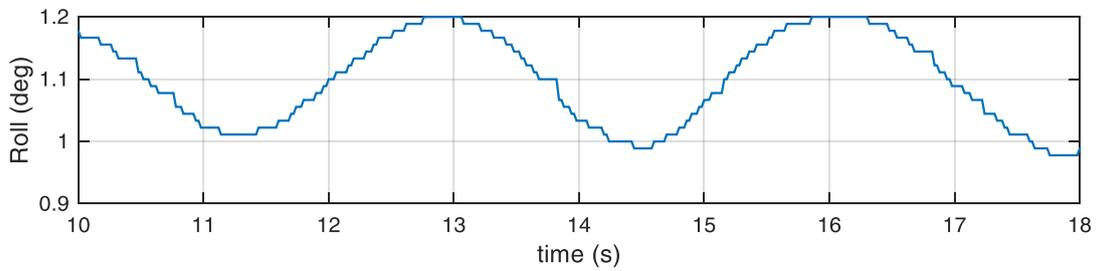
c092.mat



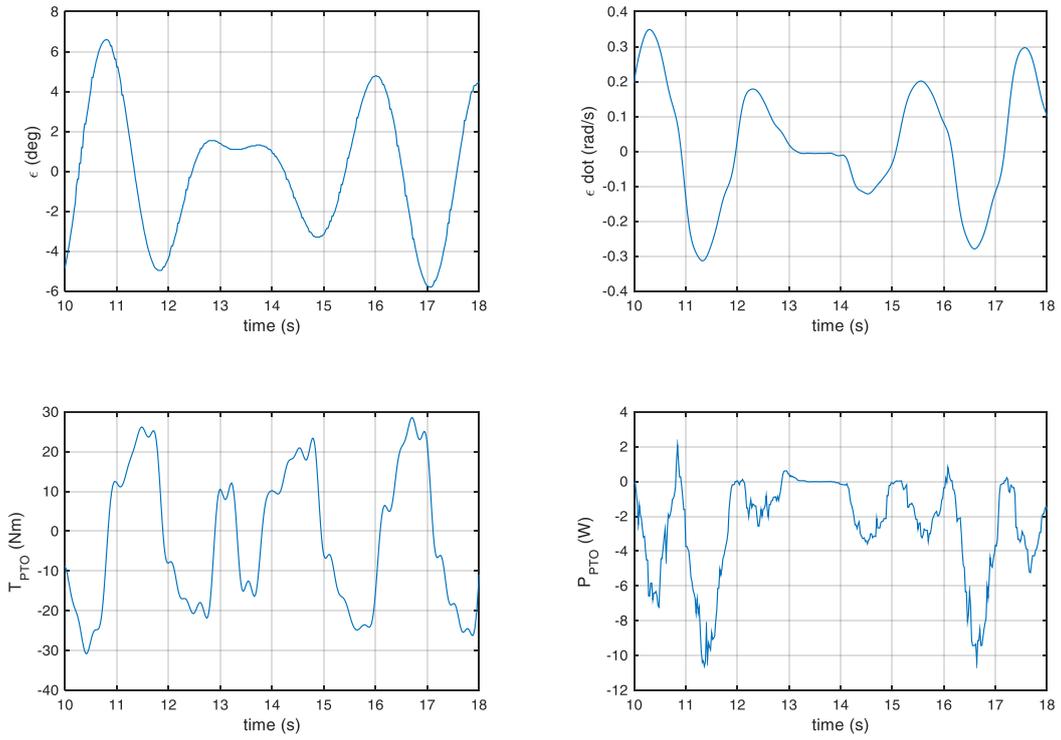
c093.mat



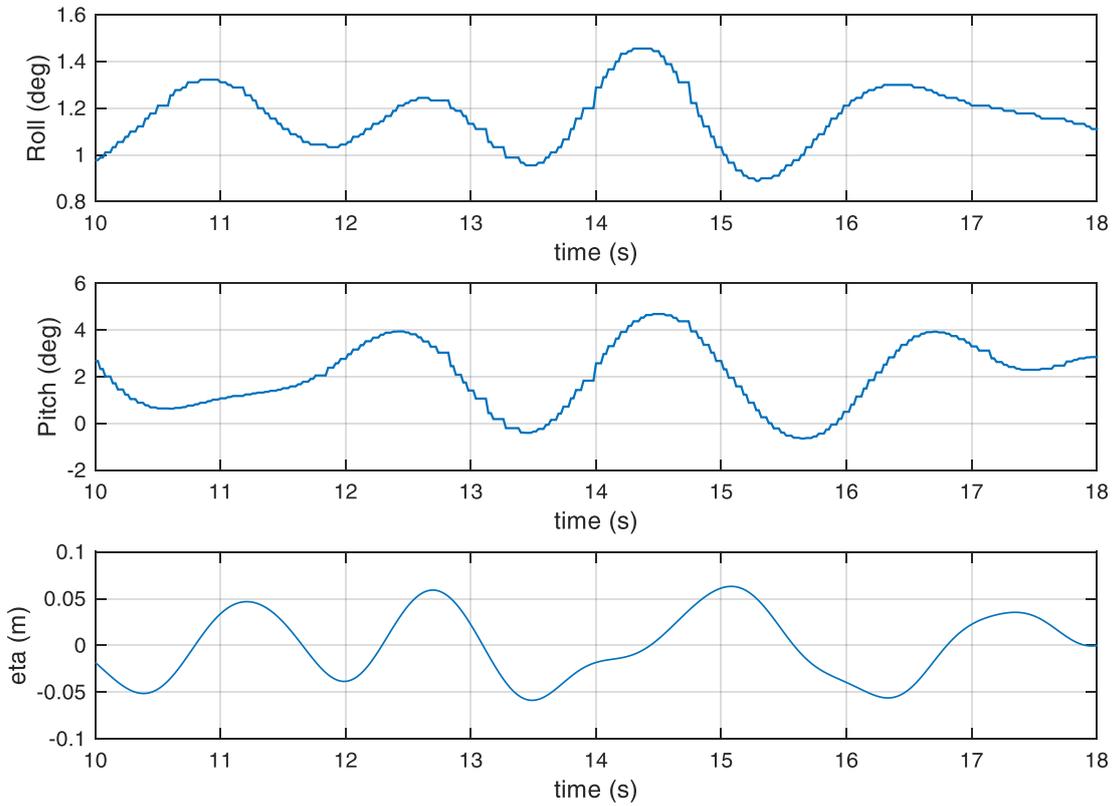
c093.mat



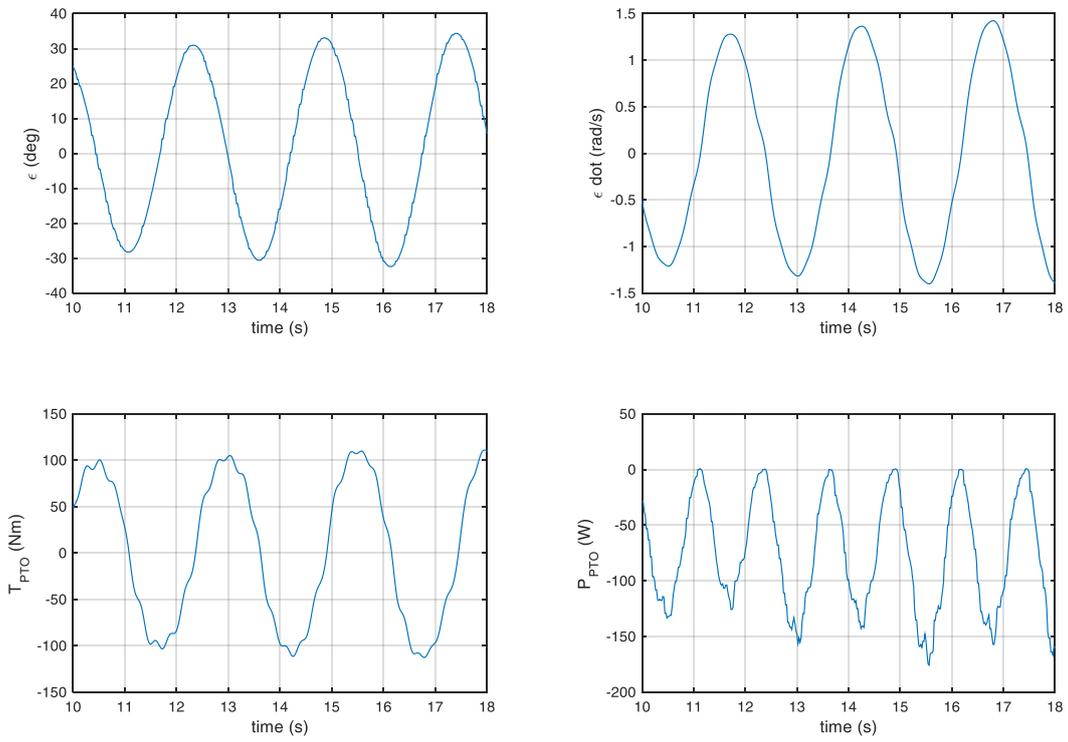
c094.mat



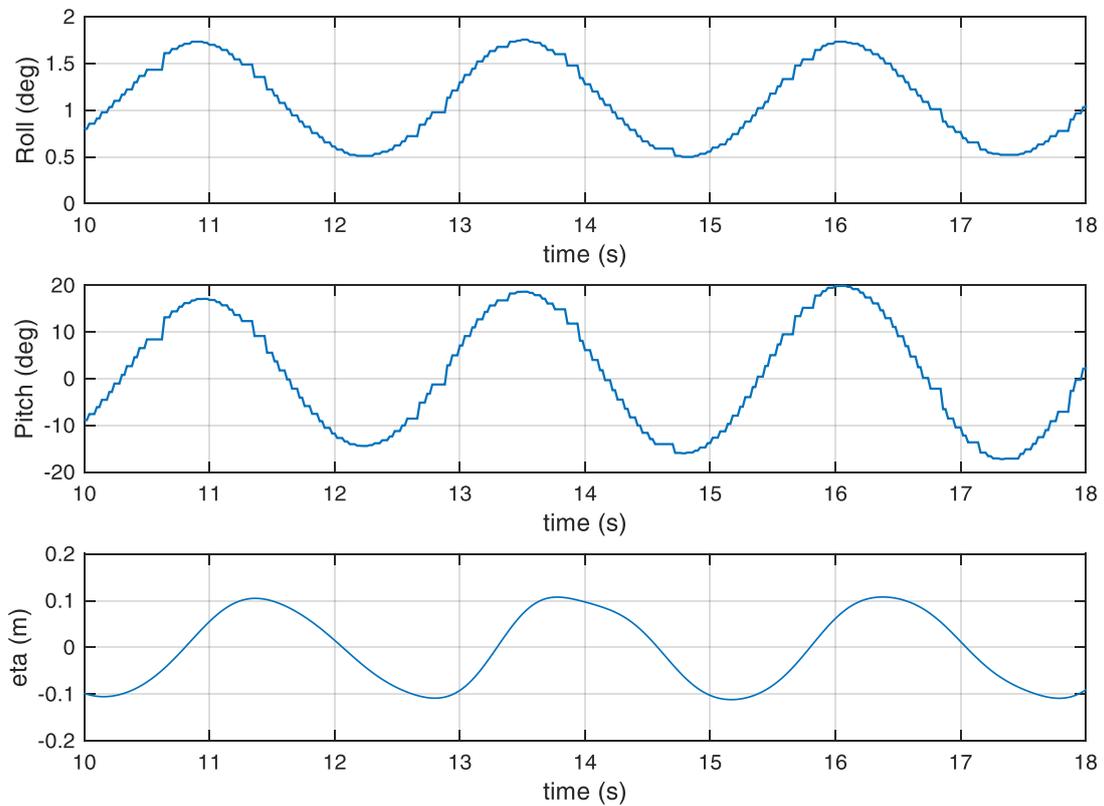
c094.mat



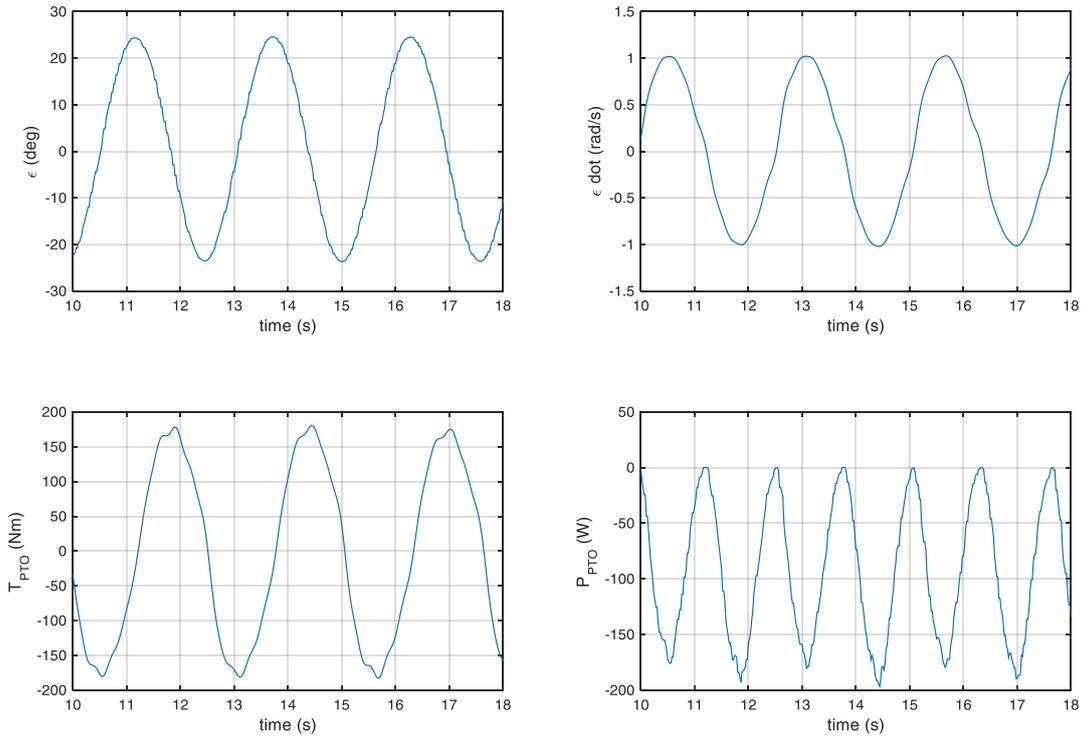
c095.mat



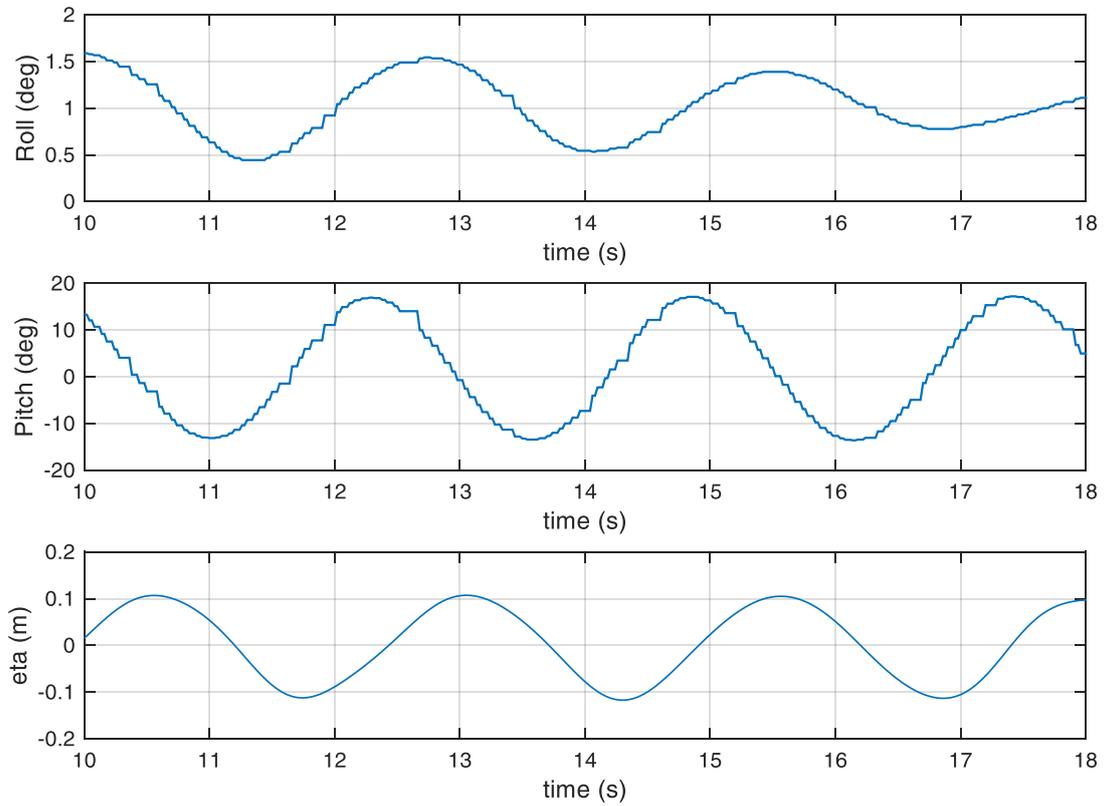
c095.mat



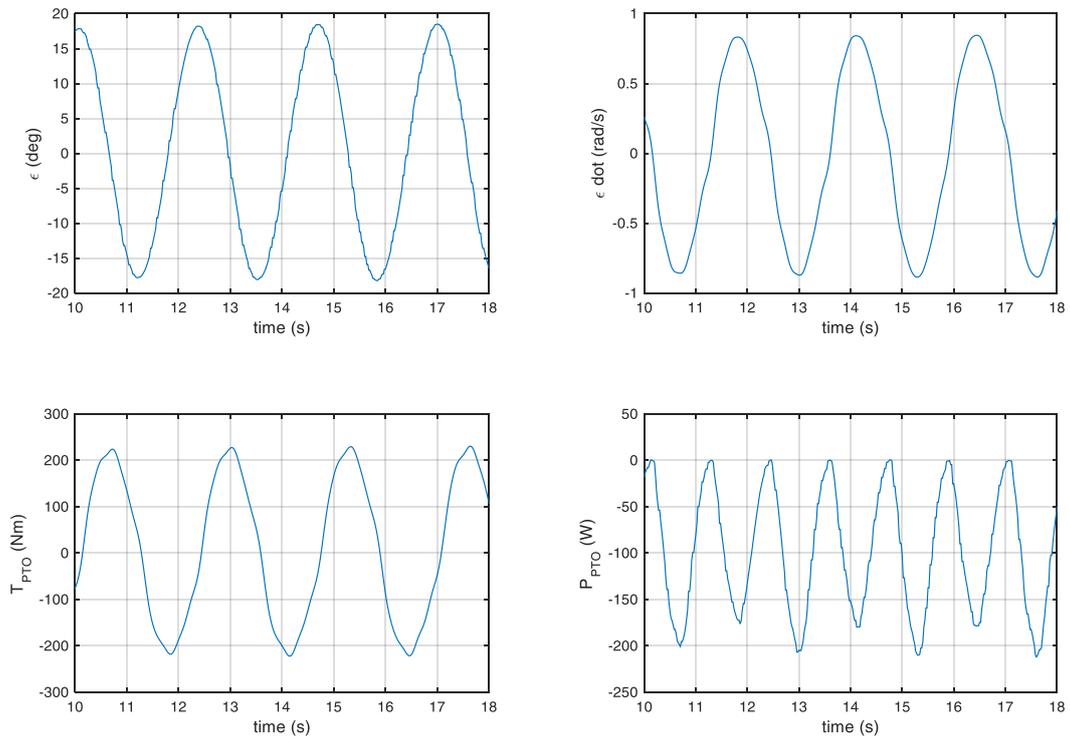
c096.mat



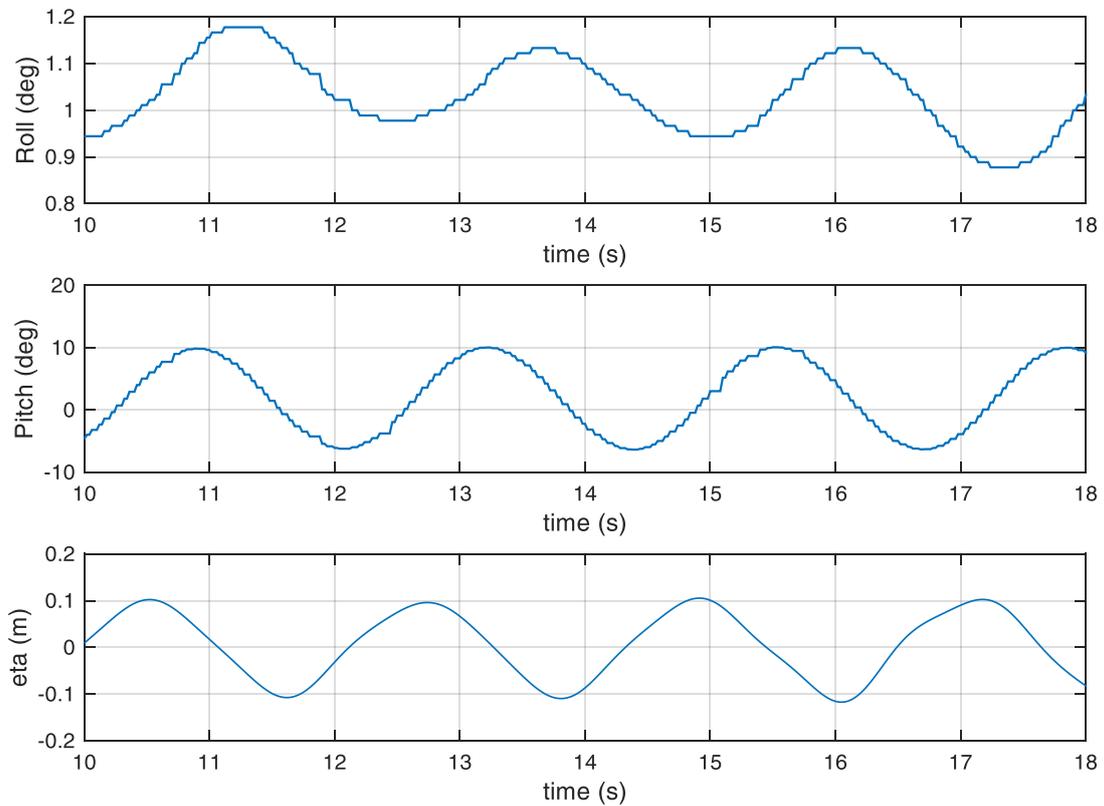
c096.mat



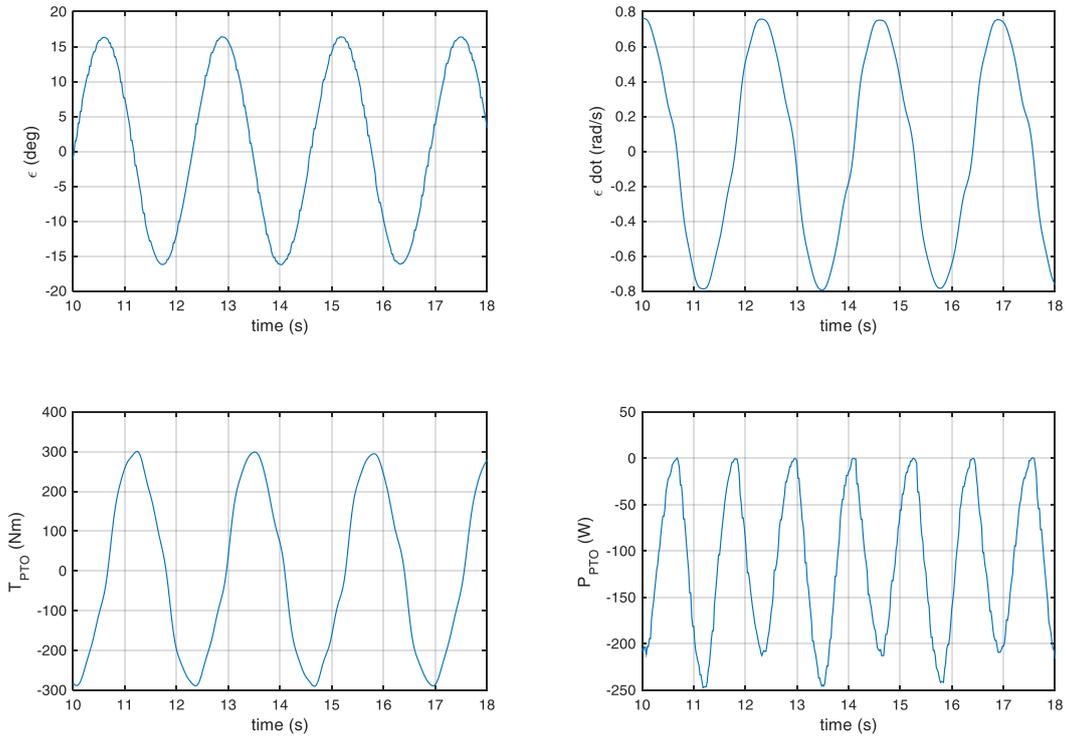
c097.mat



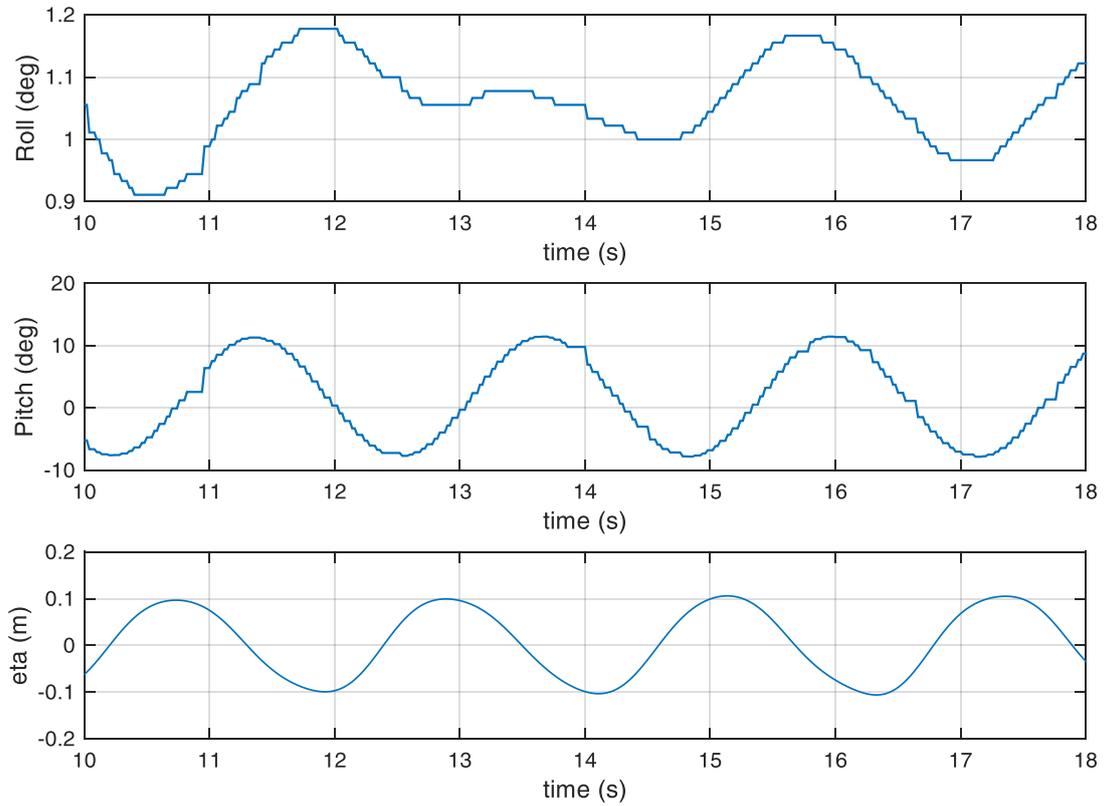
c097.mat



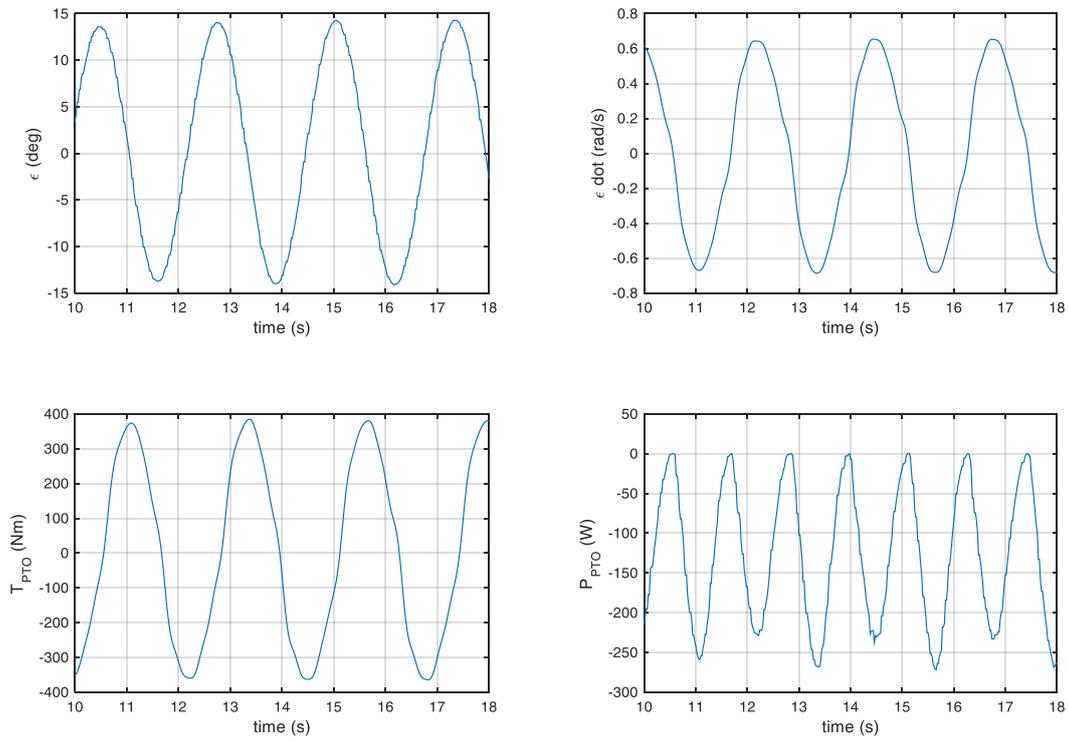
c098.mat



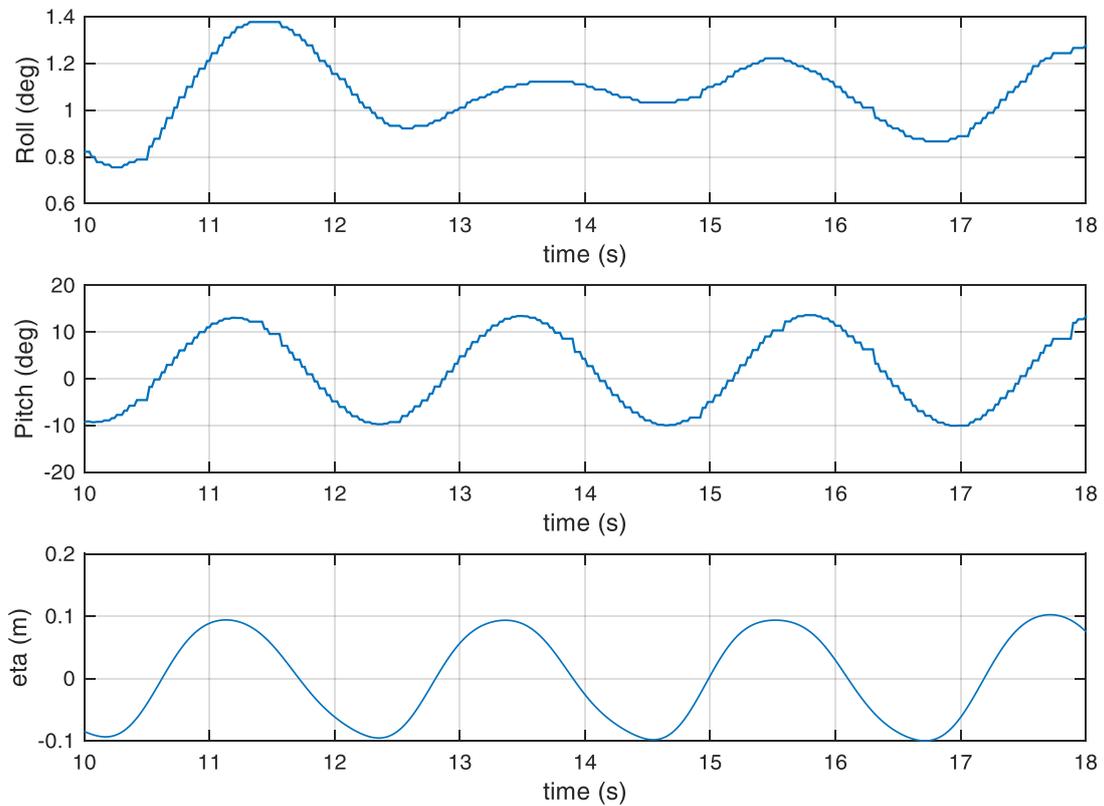
c098.mat



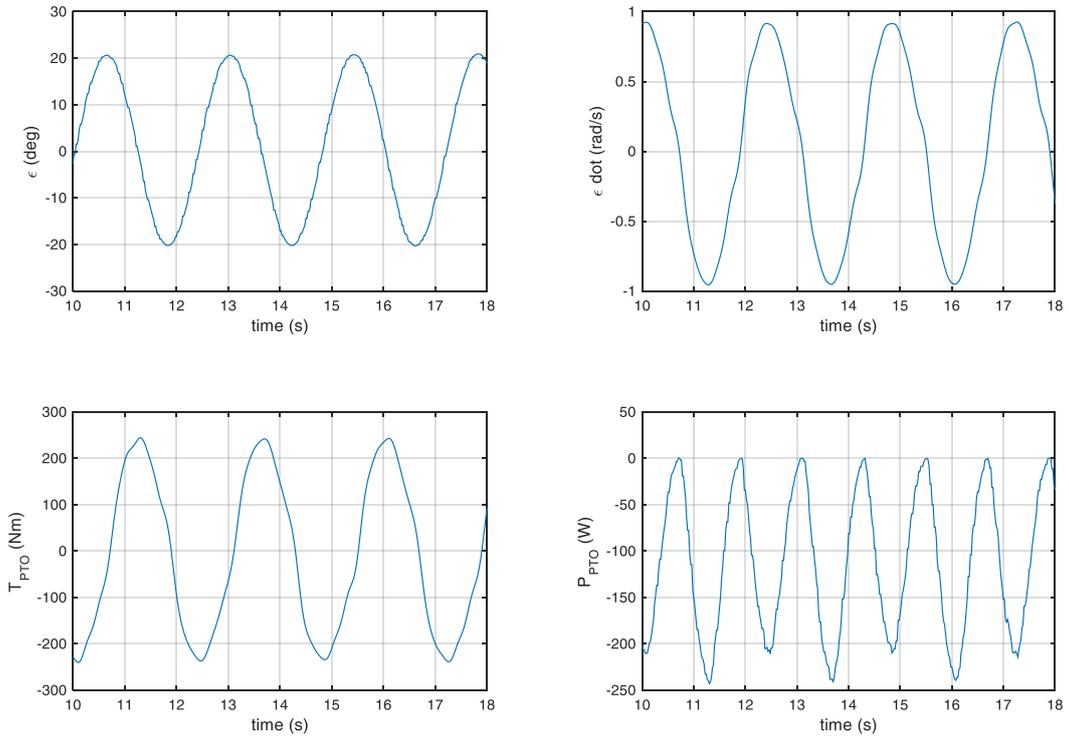
c099.mat



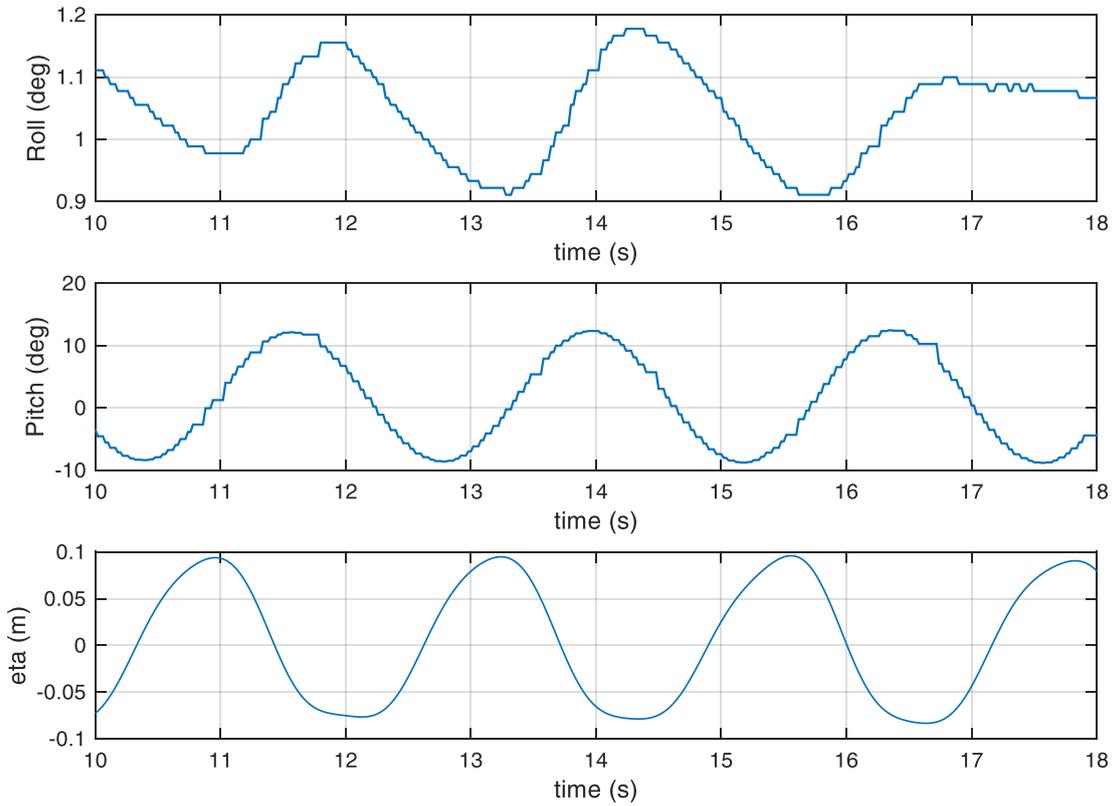
c099.mat



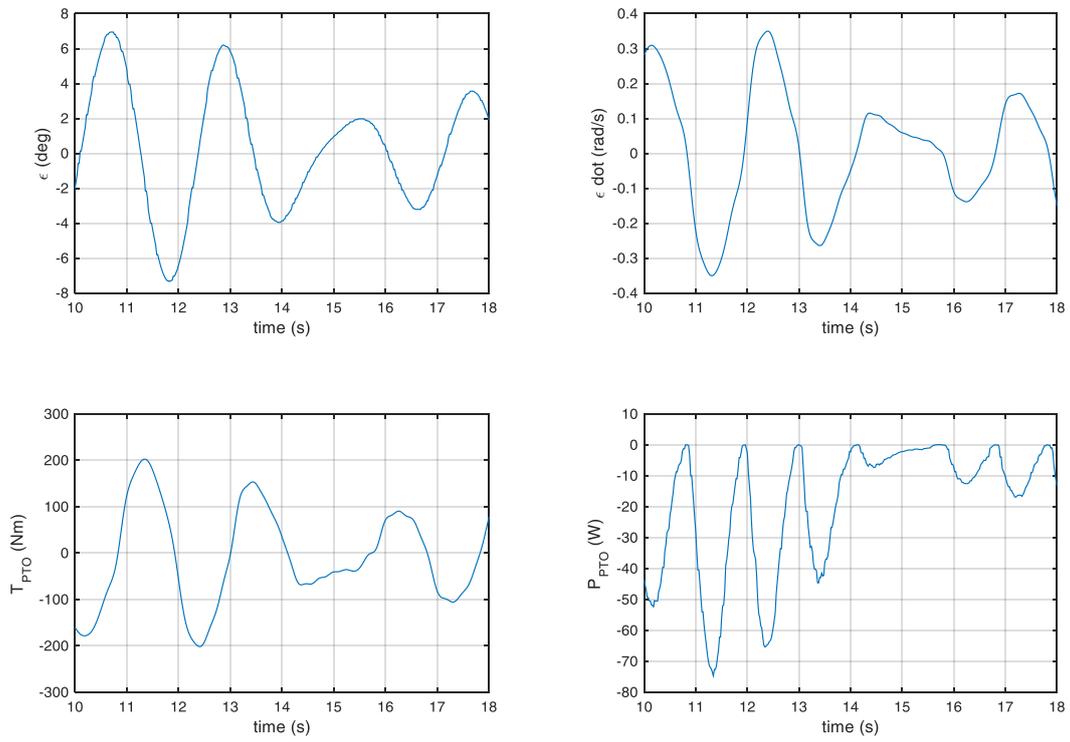
c100.mat



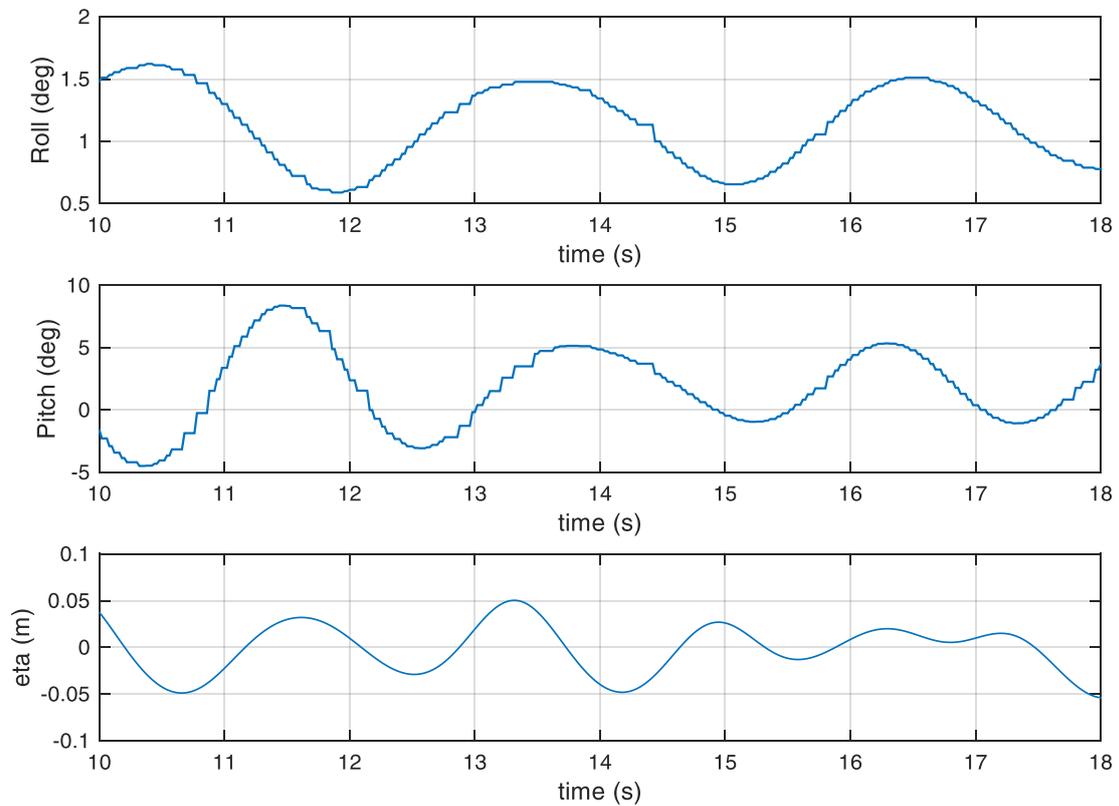
c100.mat



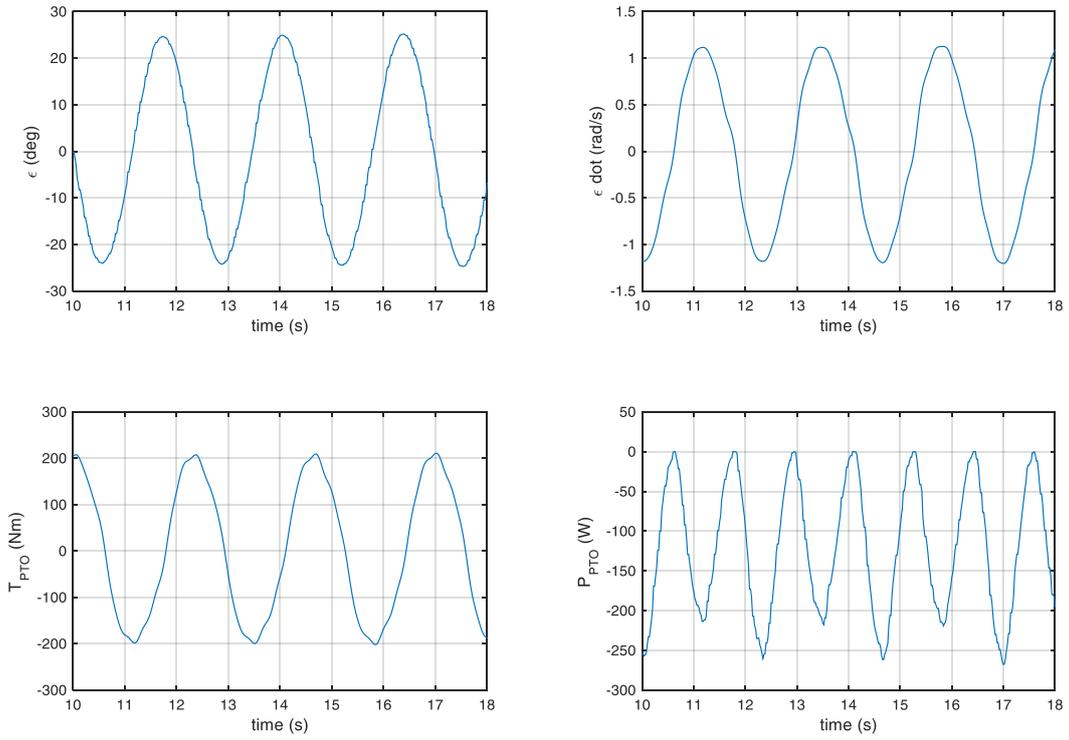
c101.mat



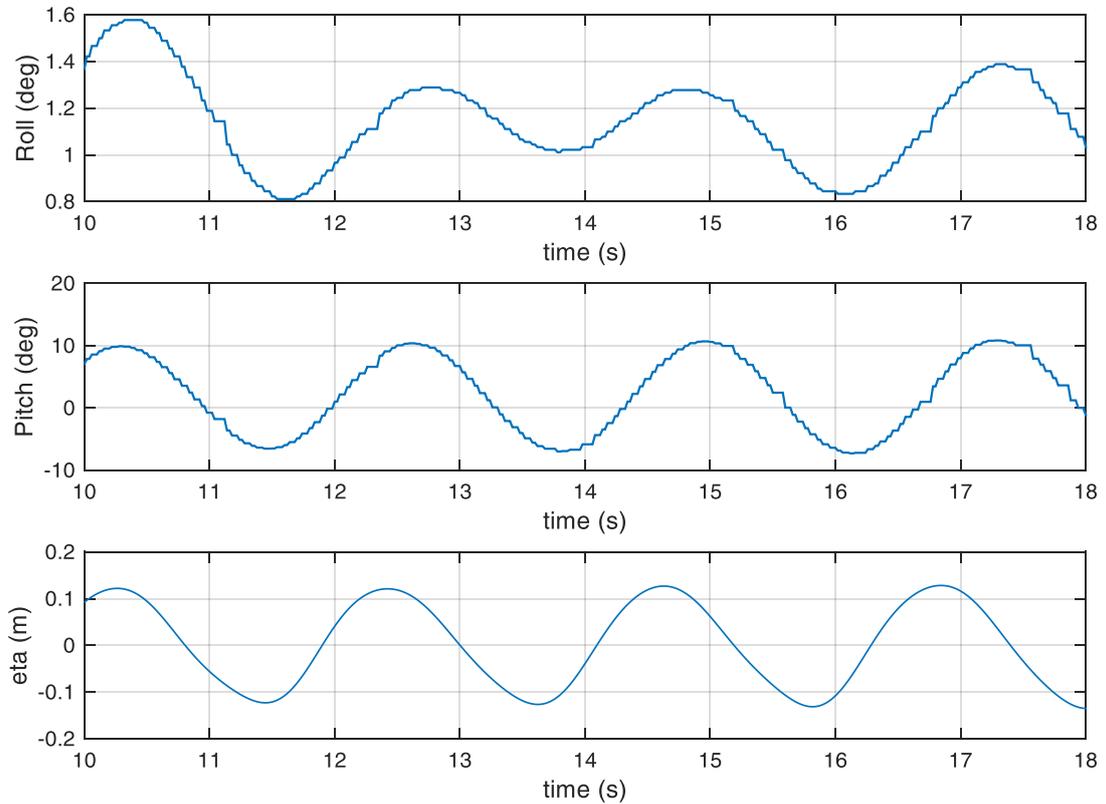
c101.mat



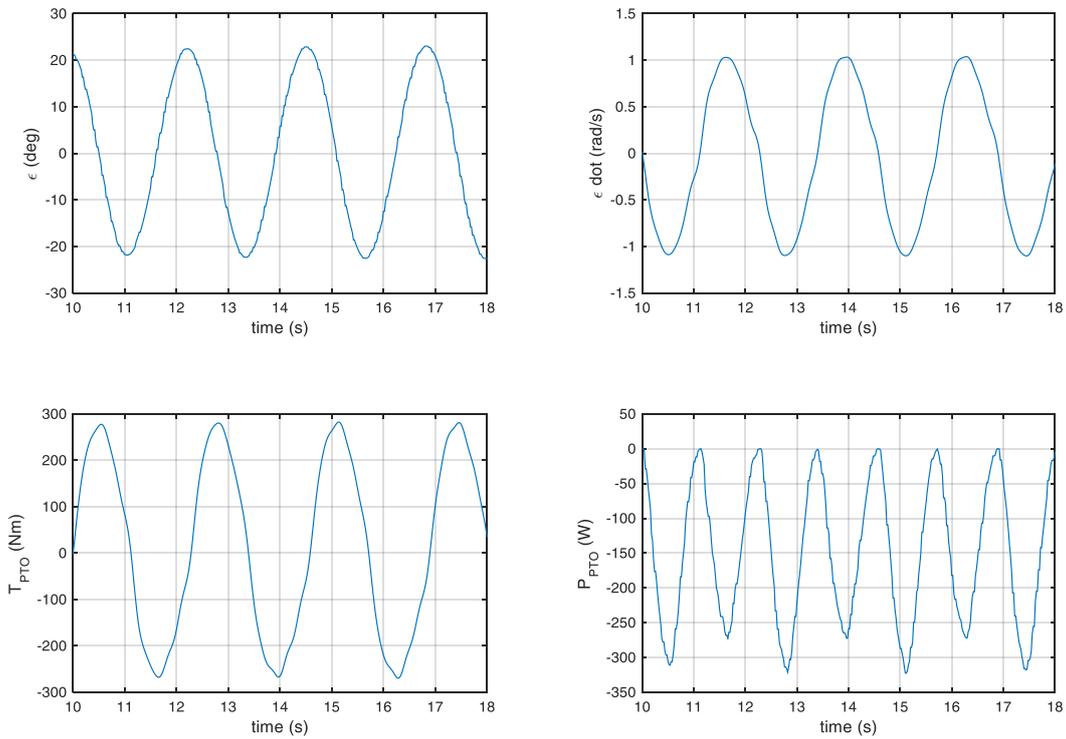
c102.mat



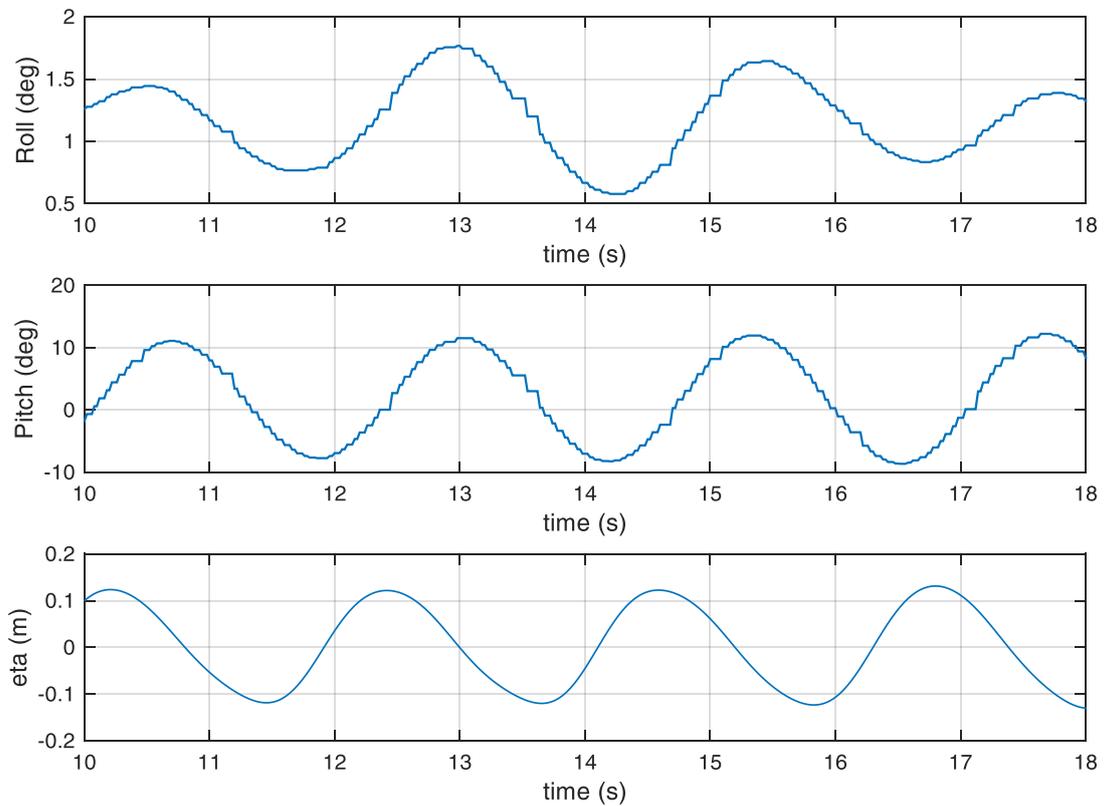
c102.mat



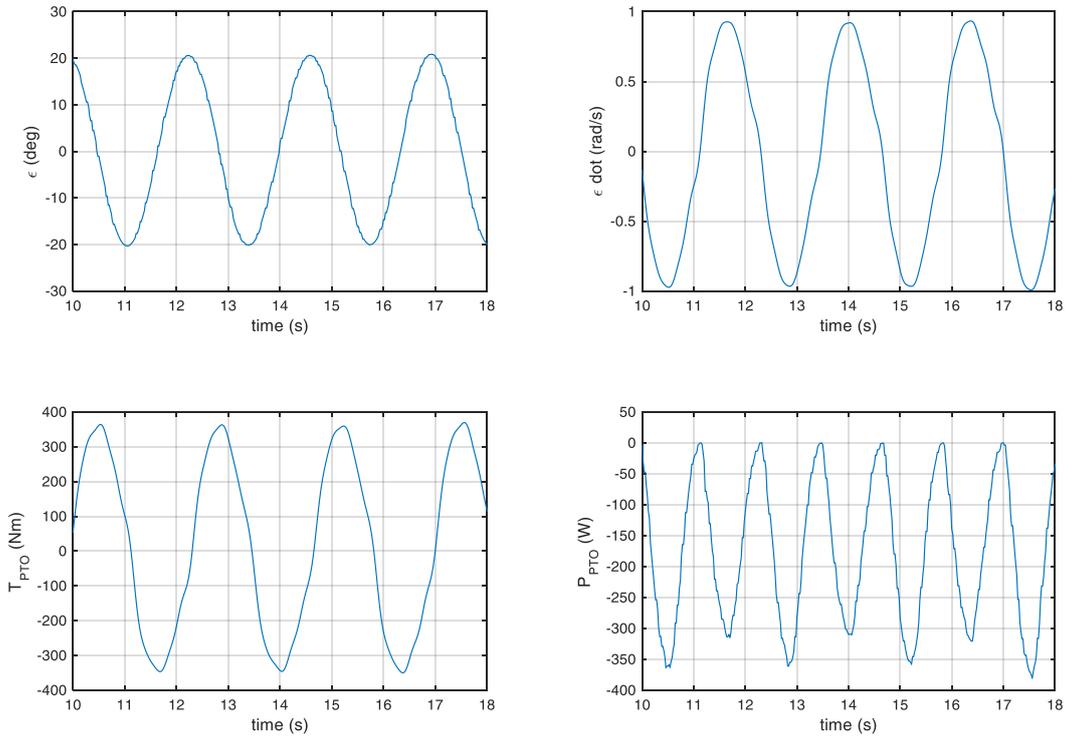
c103.mat



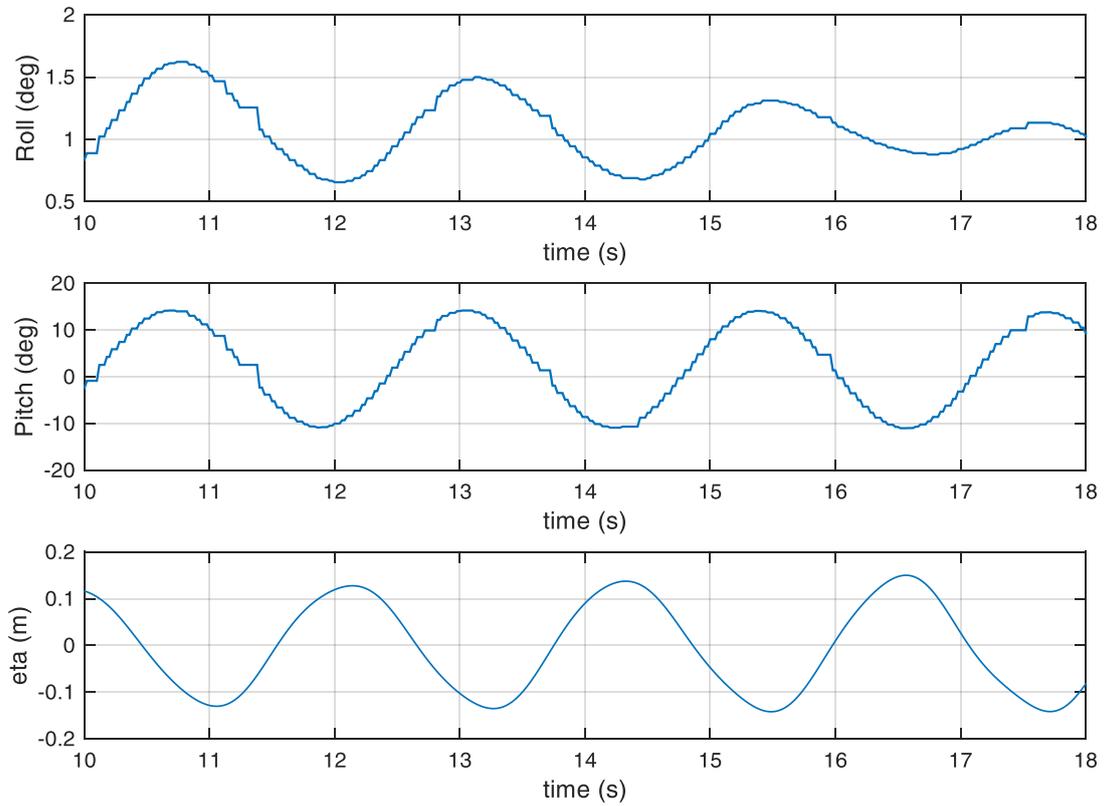
c103.mat



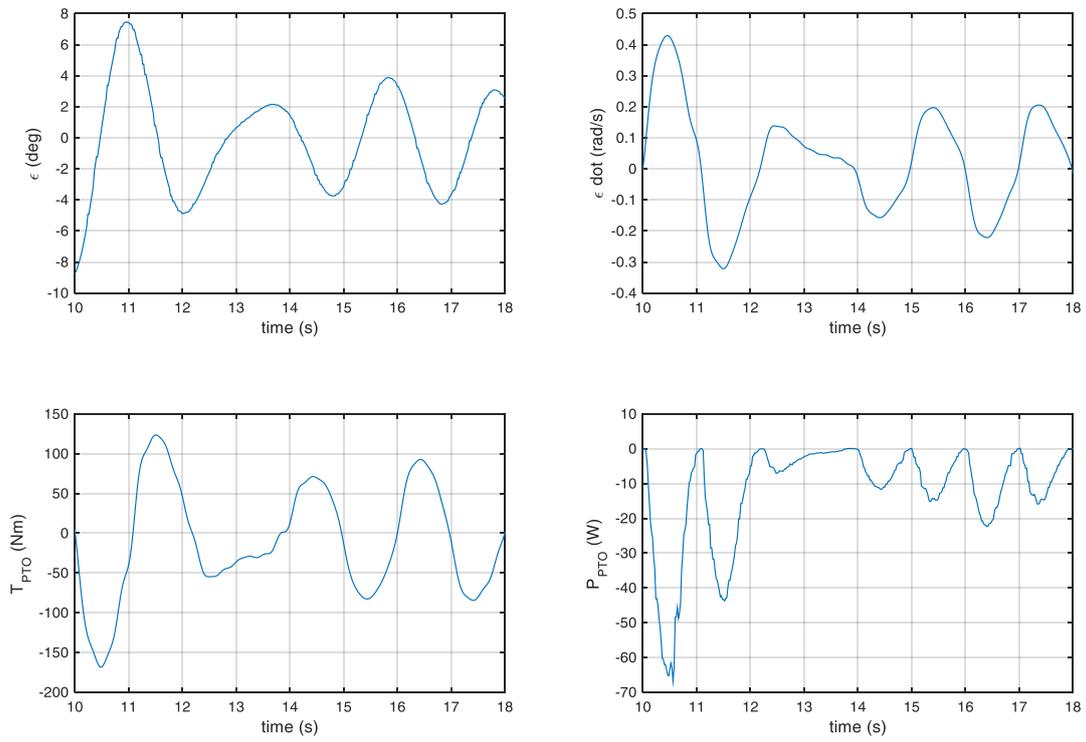
c104.mat



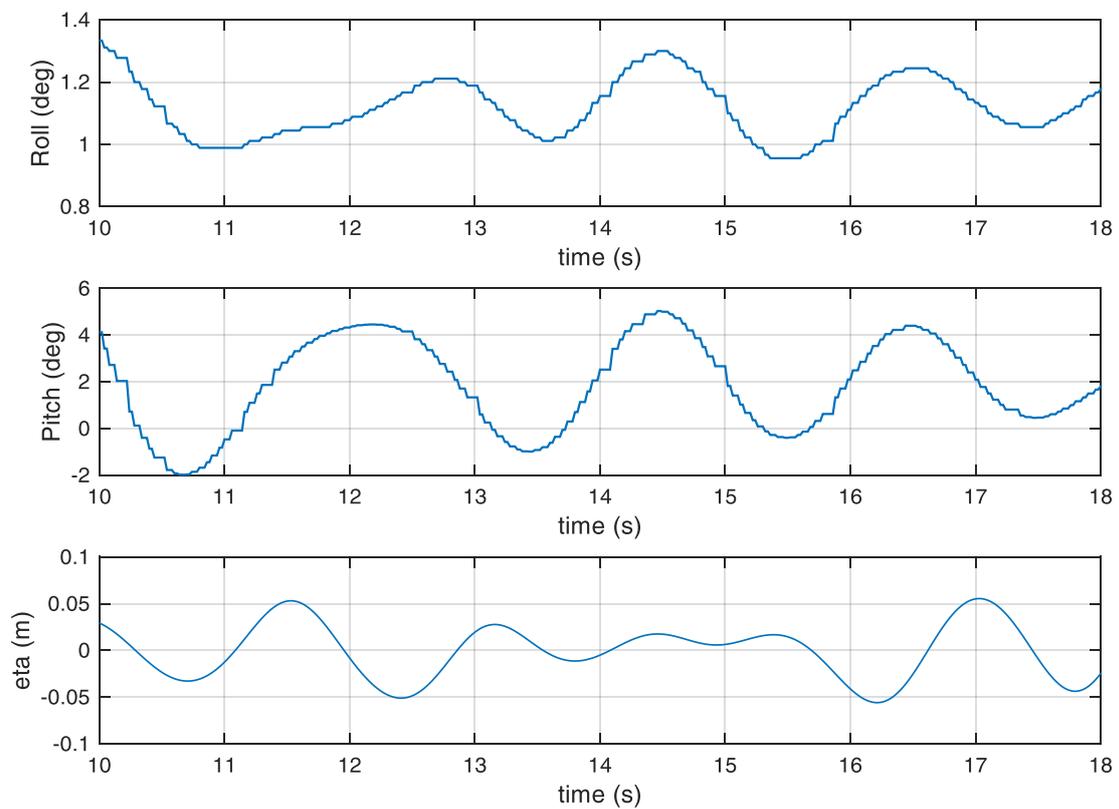
c104.mat



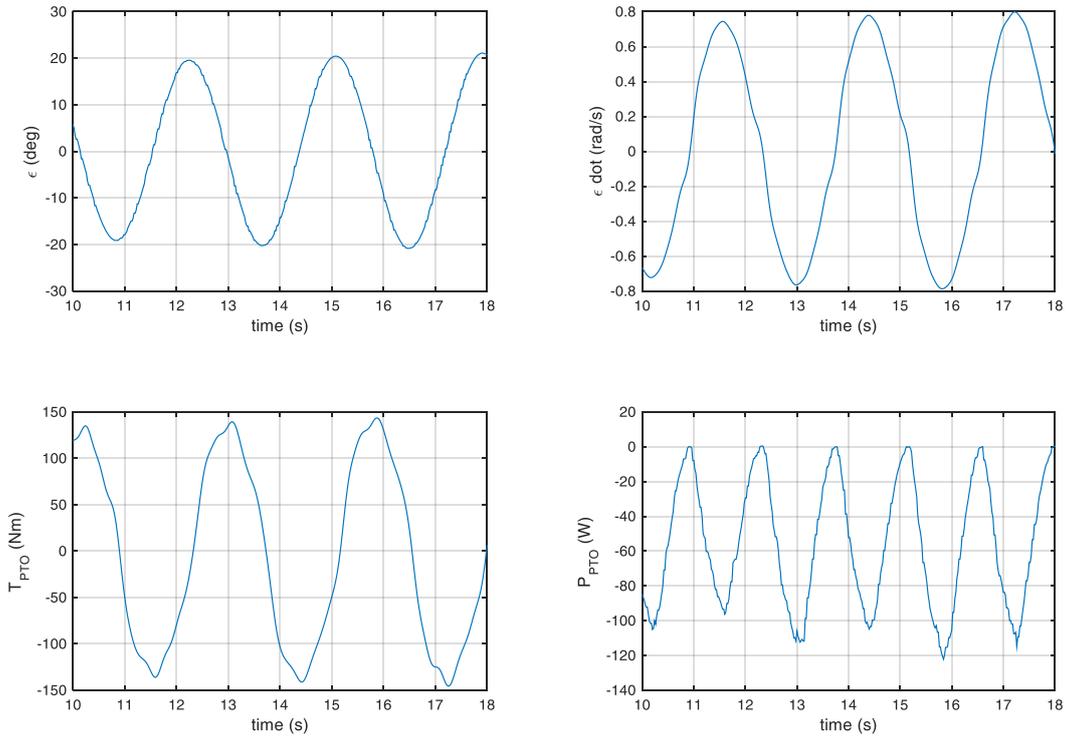
c105.mat



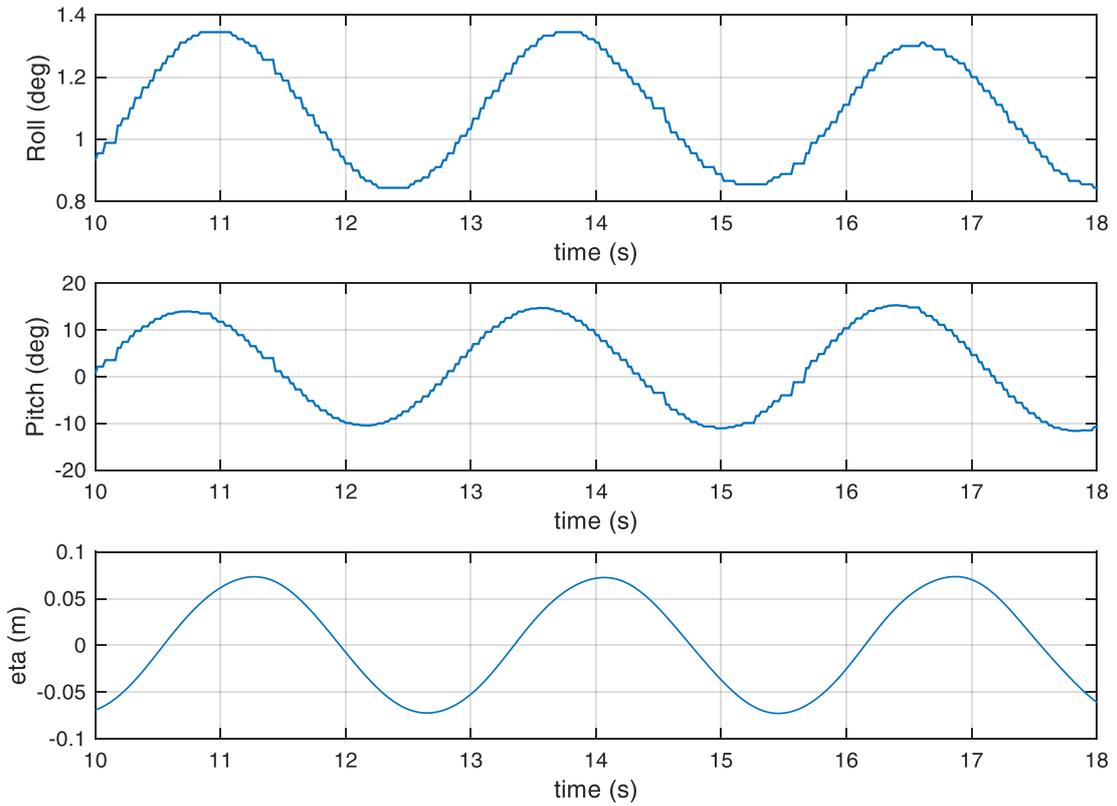
c105.mat



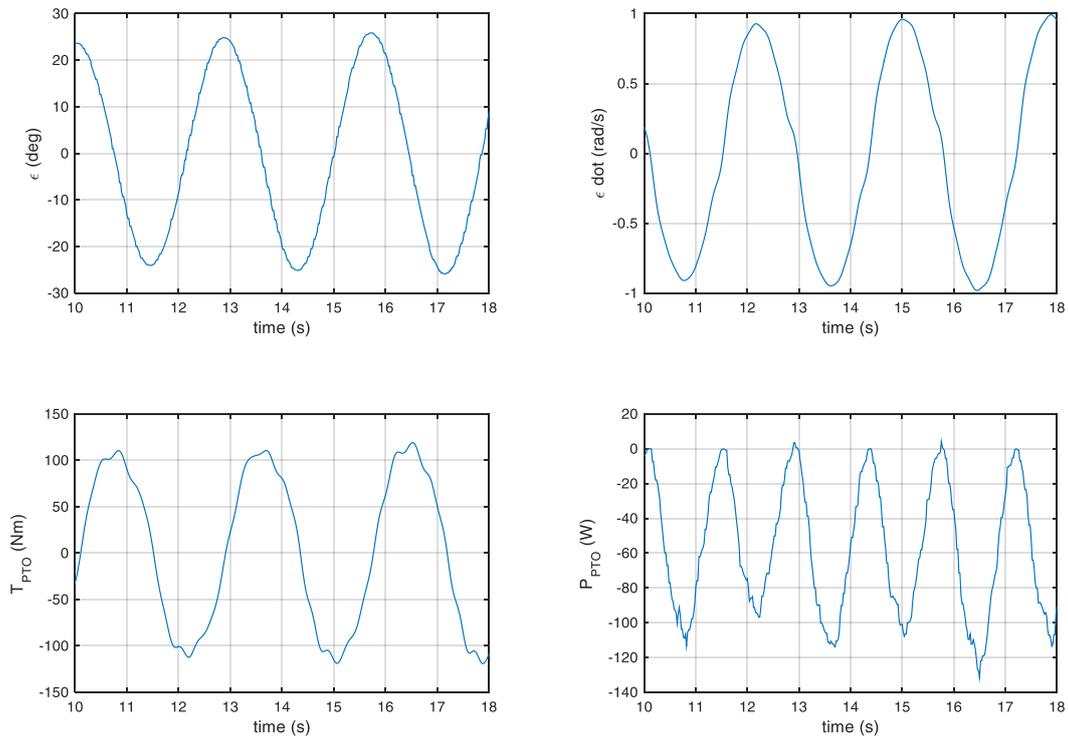
c106.mat



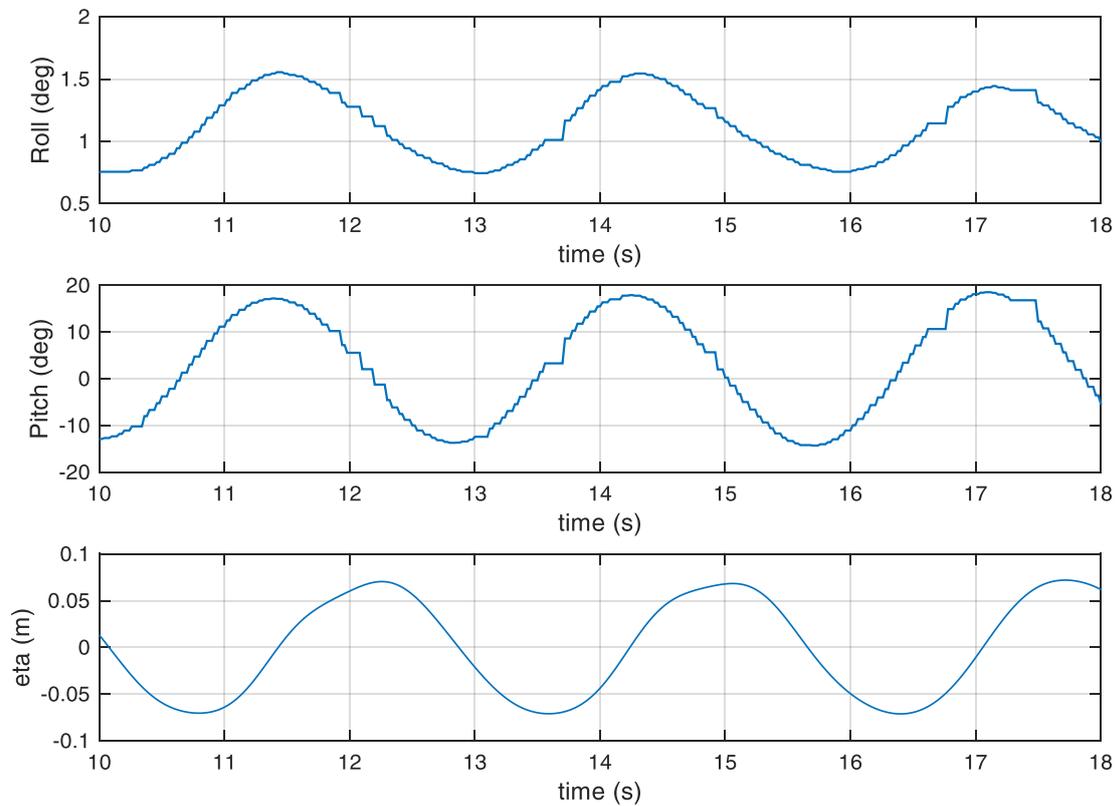
c106.mat



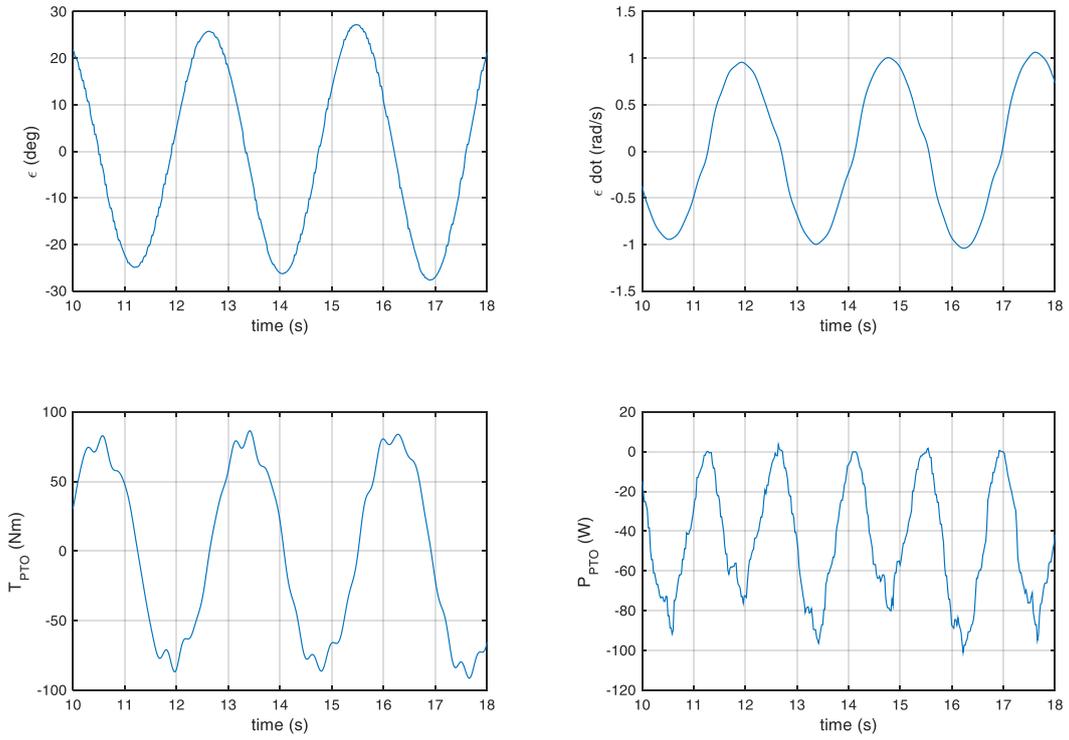
c107.mat



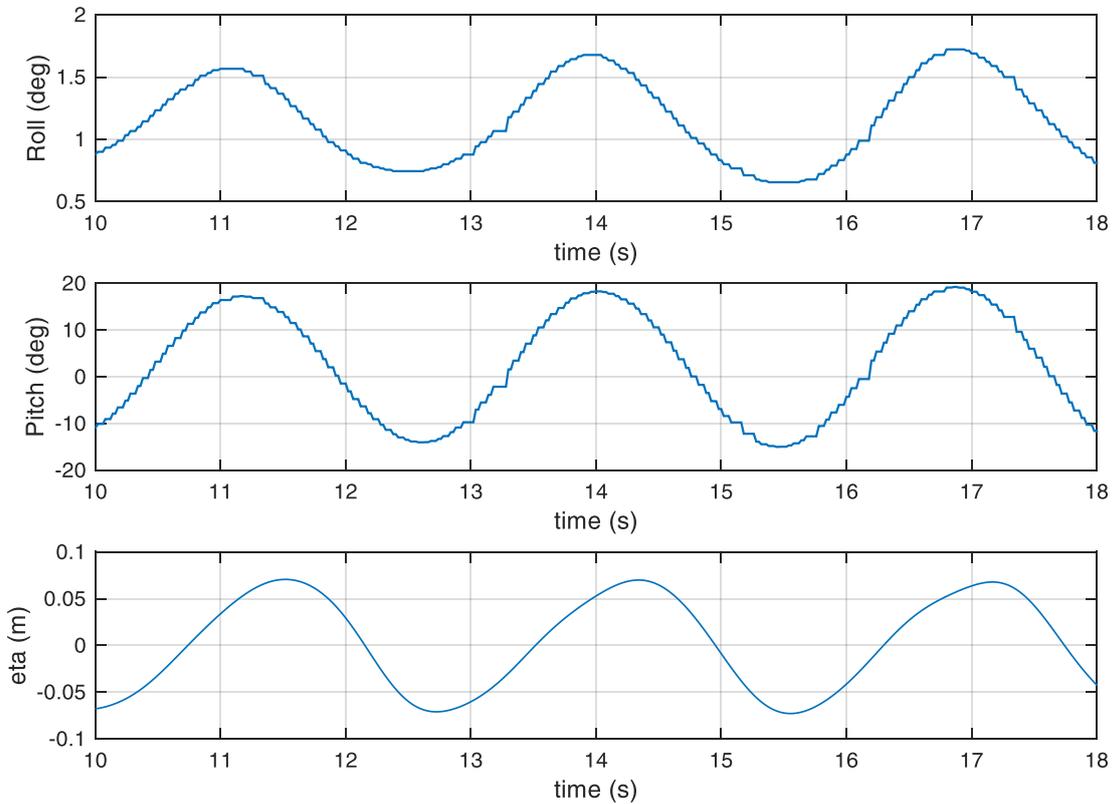
c107.mat



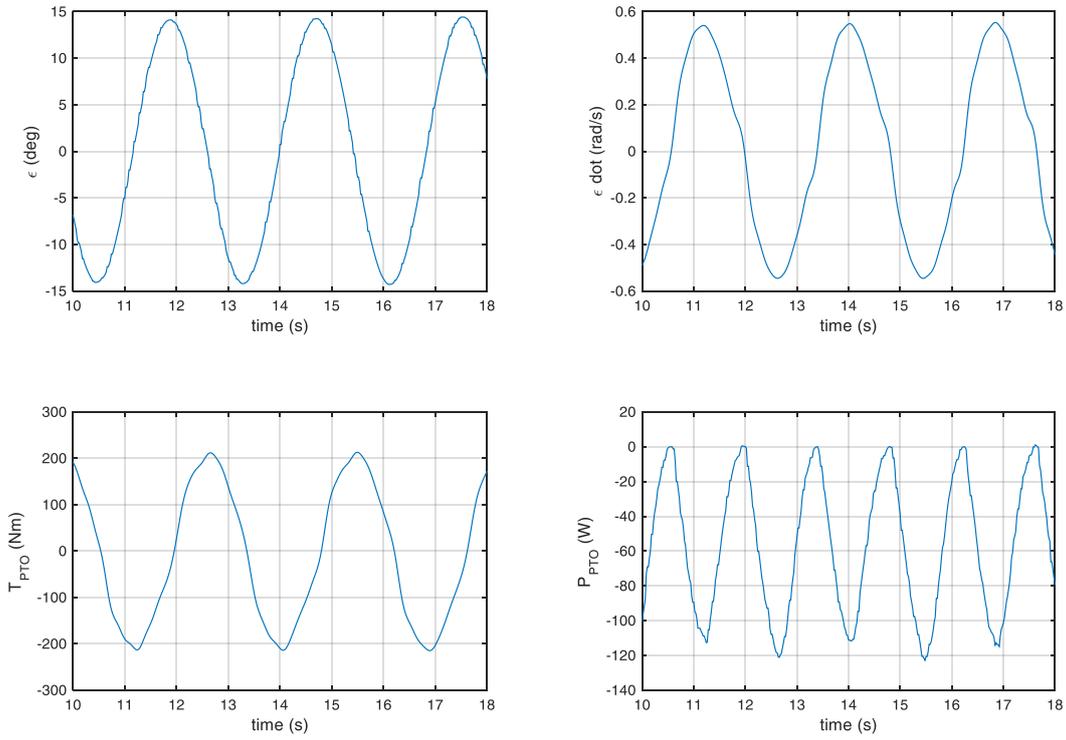
c108.mat



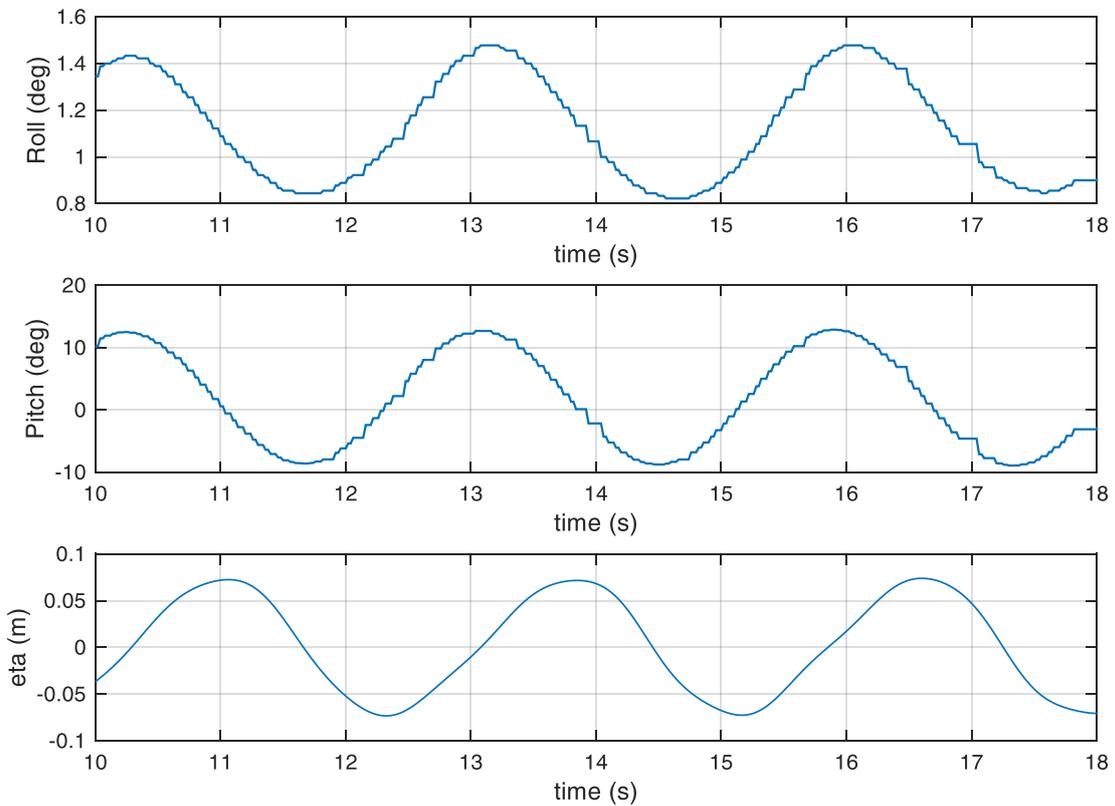
c108.mat



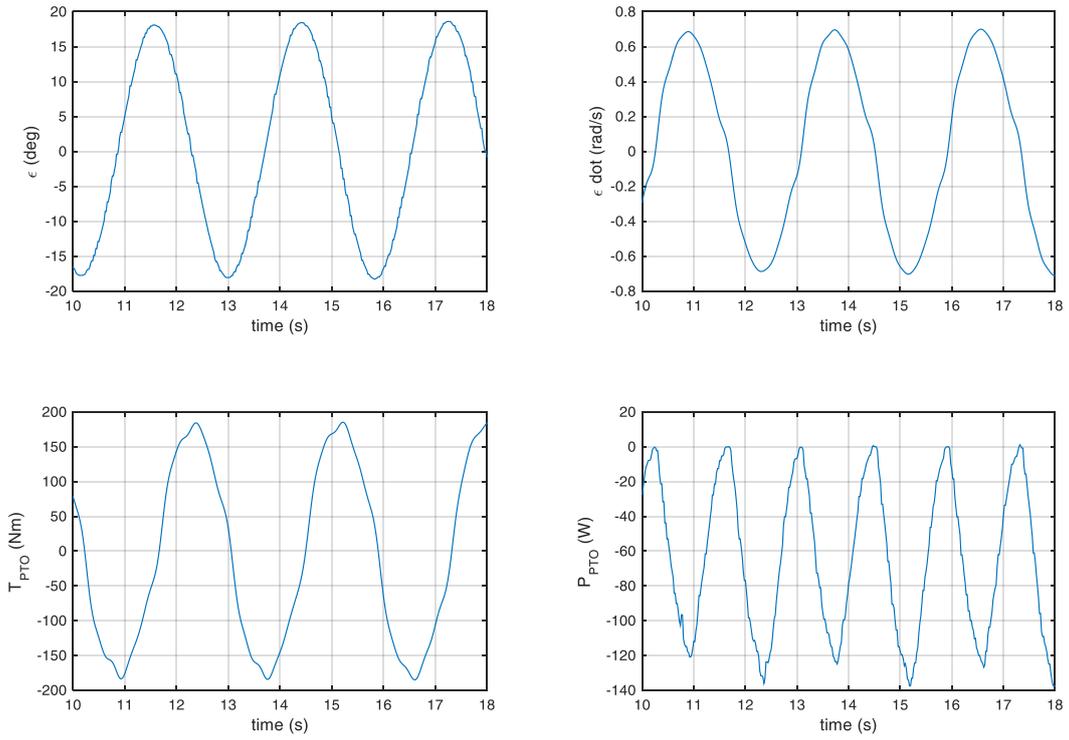
c109.mat



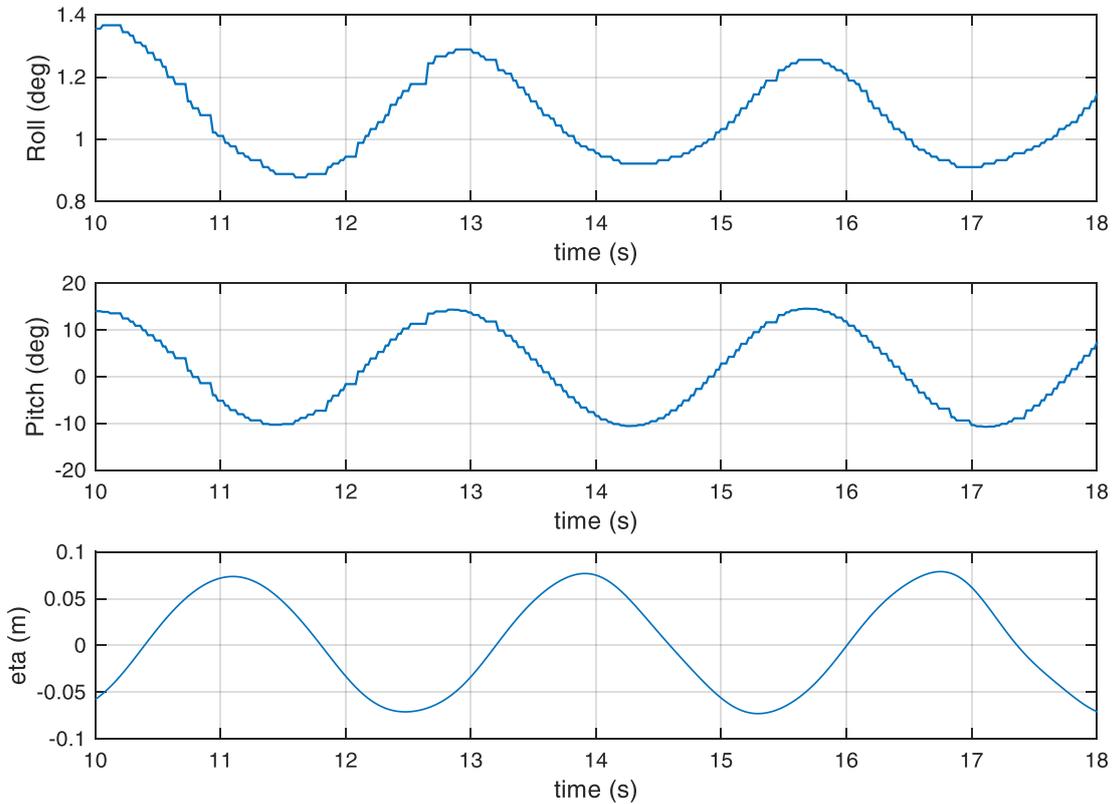
c109.mat



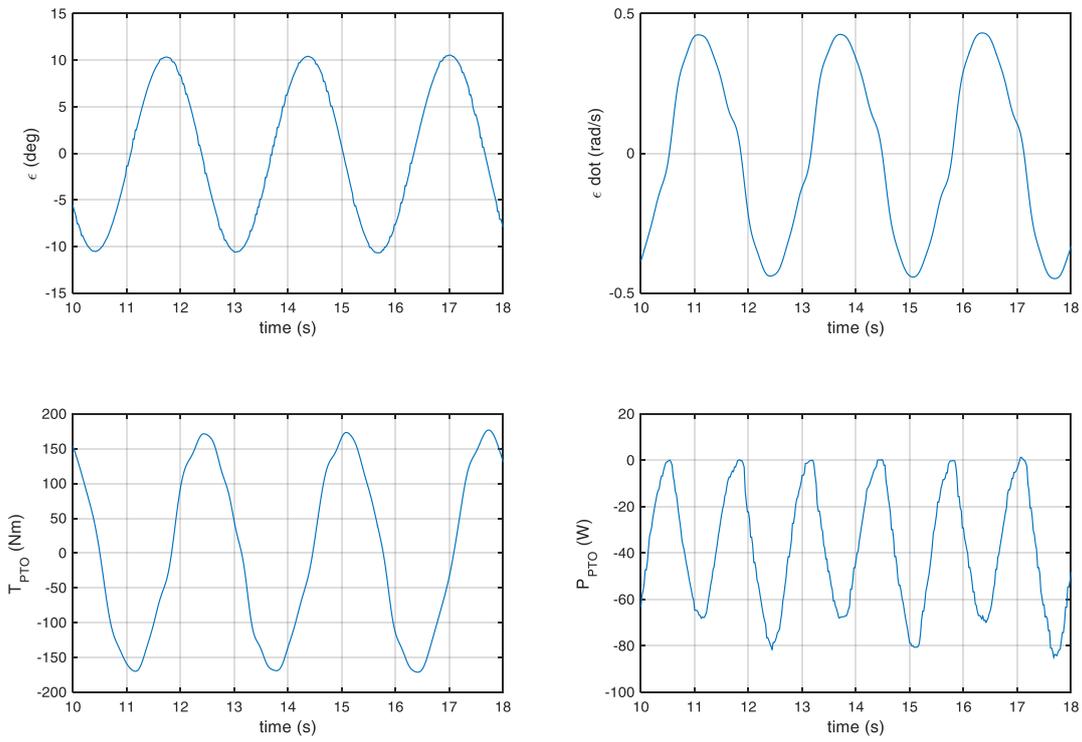
c110.mat



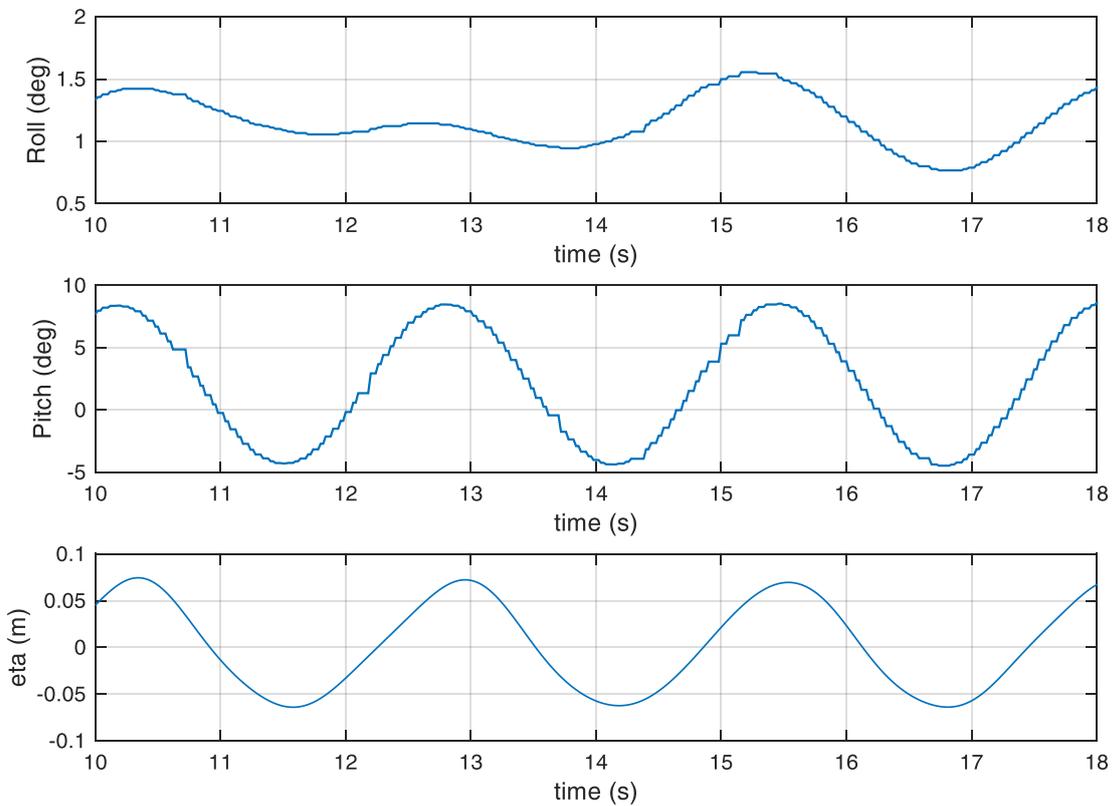
c110.mat



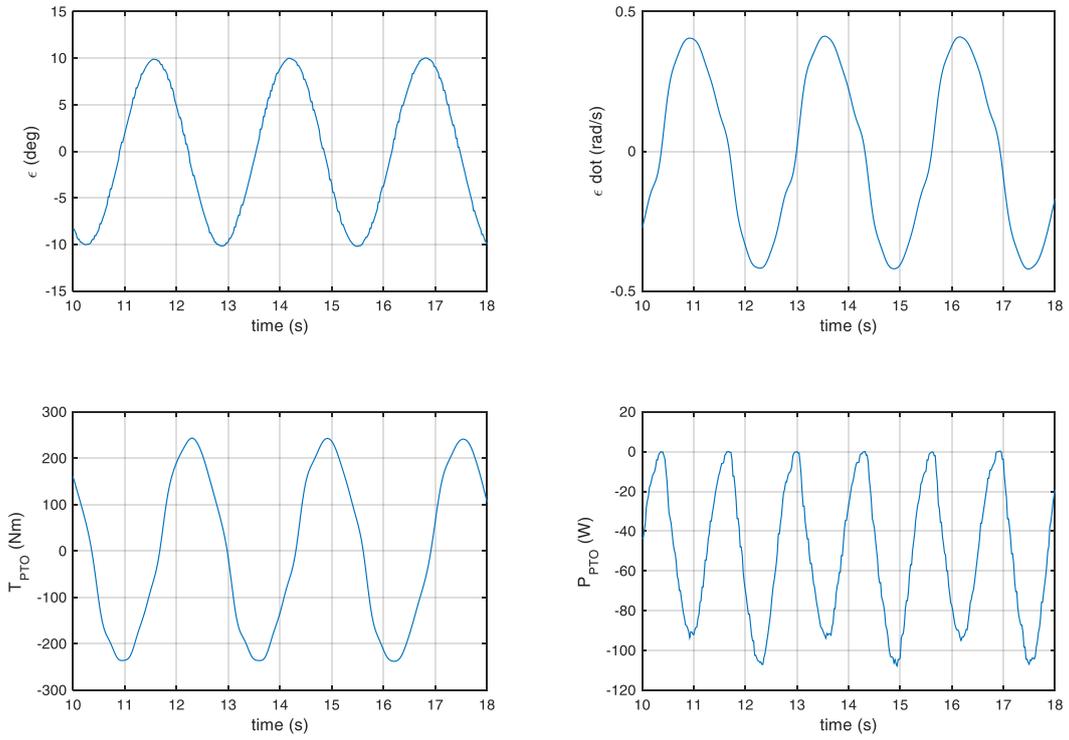
c111.mat



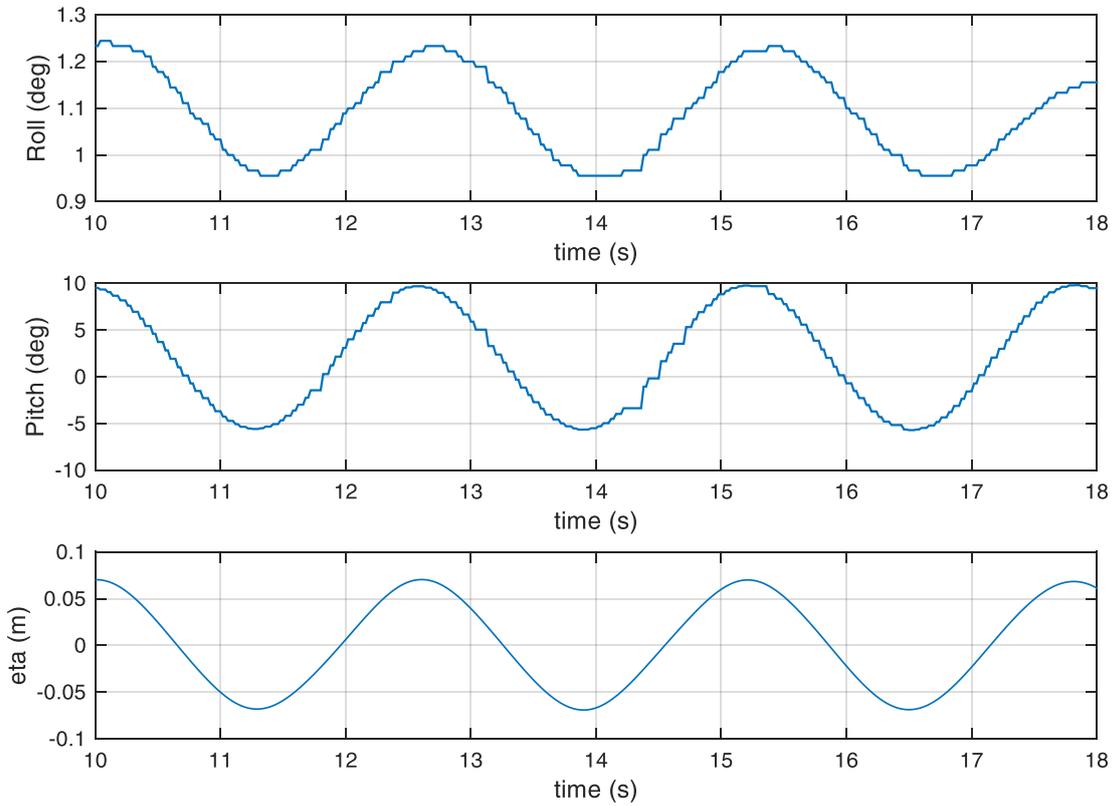
c111.mat



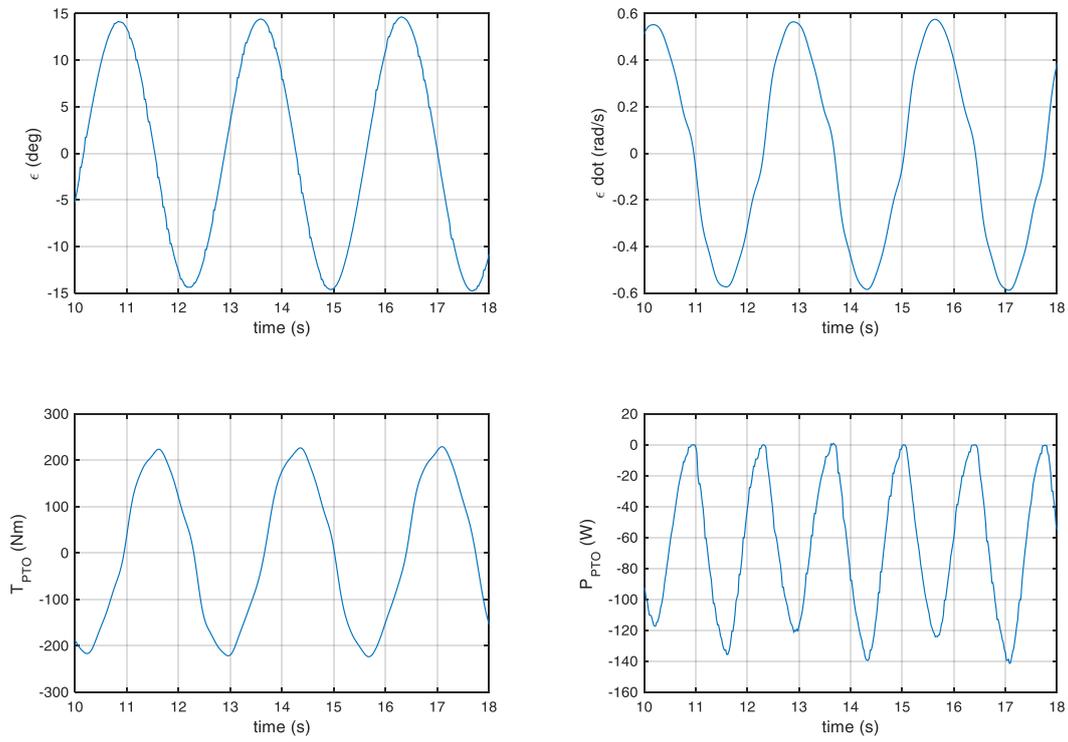
c112.mat



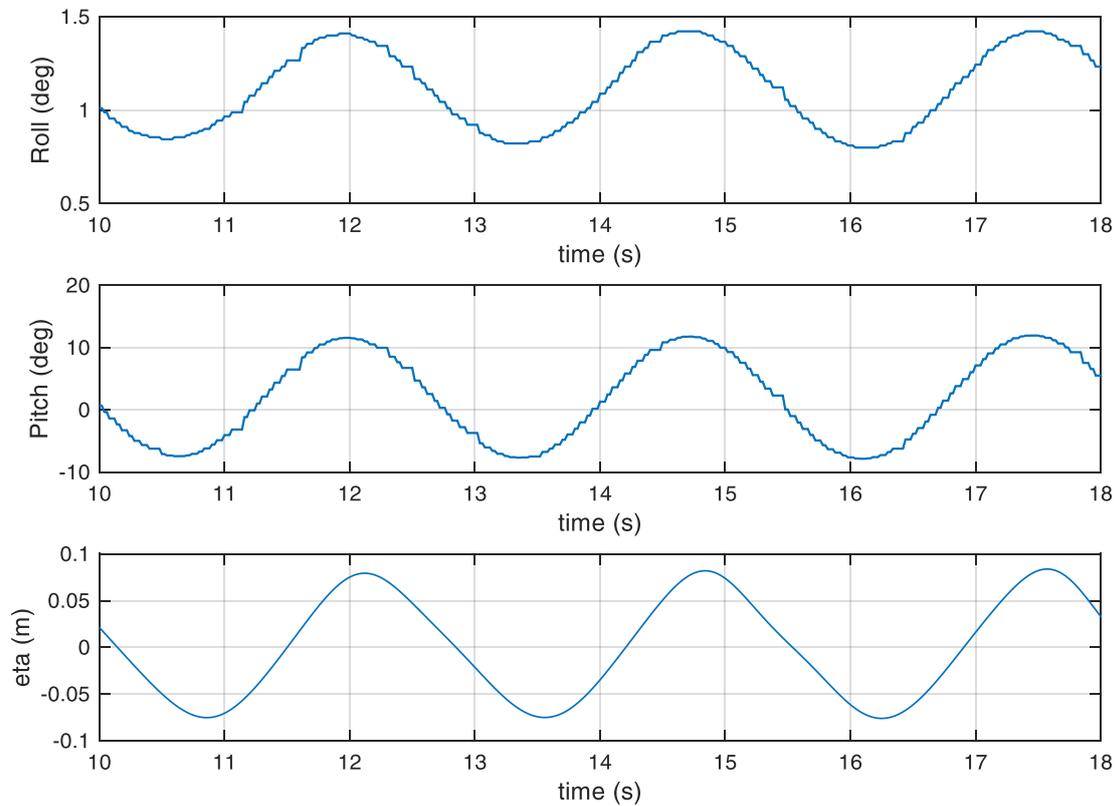
c112.mat



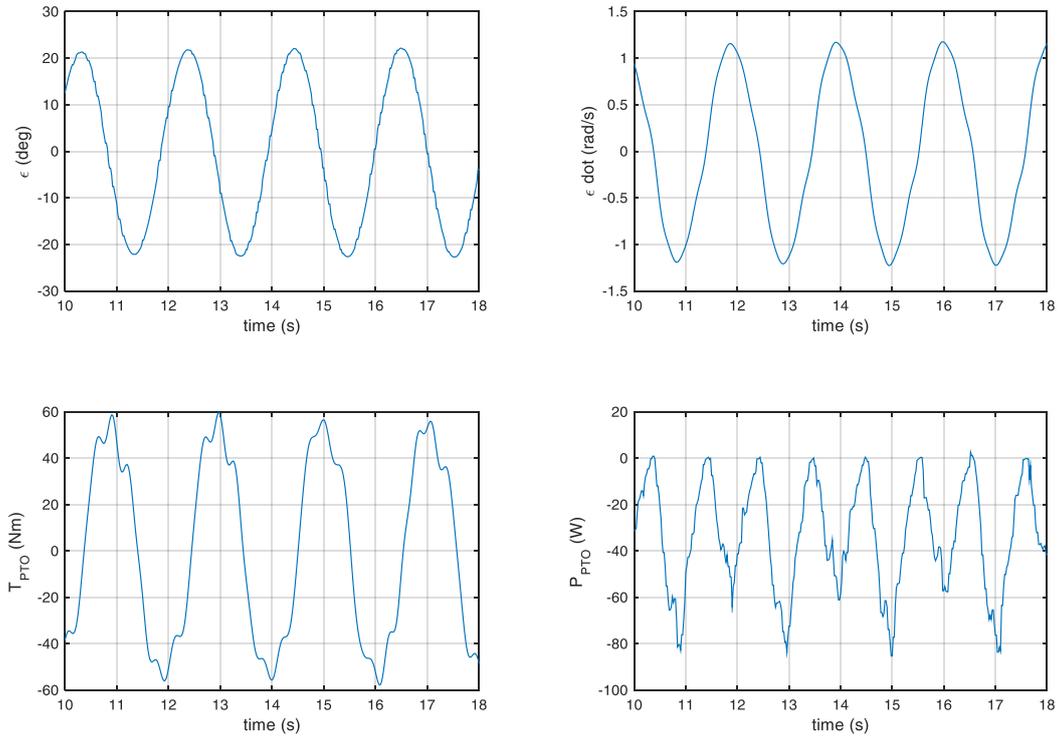
c113.mat



c113.mat



c114.mat



c114.mat

