

Frascati, December 4, 2000

Note: **ME-12**

## **SISTEMA PER IL MOVIMENTO DEI TRIPLETTI DI KLOE**

*F. Sgamma*

### **Premessa**

Il possibile ripristino del sistema di movimento dei due tripletti quadrupolari, inseriti nell'apparato sperimentale di KLOE, determina la necessità di riutilizzare l'algoritmo che lega le posizioni angolari delle cinque *cammes* ai cinque parametri che definiscono la posizione dei tripletti (coordinate del baricentro nel piano verticale e angoli "roll", "pitch", "jaw" rispetto all'assetto nominale).

Tale algoritmo è stato sviluppato da G. Raffone ed è illustrato dettagliatamente nella Nota Tecnica ME-3 del 16 Aprile 1993 dal titolo: "On the triplet support barrel positioning mechanism". Successivamente G. Delle Monache, anche per modifiche geometriche relative alla posizione delle tre *cammes* esterne (sono state spostate simmetricamente dalla parte inferiore del tripletto a quella superiore per bilanciare la posizione del baricentro, esterno alla zona compresa tra i due piani delle *cammes*), ha rivisitato l'algoritmo; in questa occasione ha proposto un'altra soluzione alle cinque equazioni finali ed ha trasferito il risultato del suo lavoro in un "foglio di lavoro" Excel, purtroppo senza conservare traccia scritta del suo lavoro di rilettura, modifica e correzione. A questo punto, insospettito da risultati non perfettamente giustificabili geometricamente, ho ritenuto opportuno rivedere completamente tutto lo sviluppo analitico, proposto dal primo collega e corretto dal secondo, per eliminare la eventuale causa dell'imperfezione.

Con questa Nota, rimandando per lo sviluppo teorico alla Nota precedente, si ha quindi l'intenzione semplicemente di correggere le eventuali imperfezioni e di definire esplicitamente i parametri utilizzati nell'algoritmo inserito nel "foglio di lavoro" con le relative convenzioni per i segni, oltre che illustrare una traccia dello sviluppo analitico aggiornato alla nuova geometria delle *cammes*.

Inoltre, poiché, per una serie di inconvenienti durante la fase di installazione, la attuale posizione angolare delle *cammes* non è nota, si vuole illustrare uno schema di comportamento che consenta, utilizzando l'algoritmo, di portare i tripletti dalla attuale posizione non corretta a quella nominale, indipendentemente dalla conoscenza della "fase" attuale delle *cammes*.

## Processo analitico di soluzione

Va premesso che per una necessaria continuità con la Nota Tecnica precedente, che ne consenta una rilettura più comoda, si mantiene la massima continuità possibile, anche formale, con le schematizzazioni in essa contenute.

La figura 1 illustra la posizione delle cinque *cammes* rispetto al sistema di riferimento  $Oxyz$ , solidale con il sistema rigido che supporta il tripletto, scelto in modo da avere l'asse  $z$  coincidente con l'asse longitudinale di tale sistema di supporto e l'asse  $y$  verticale. Il piano delle *cammes* 1 e 2 e quello delle *cammes* 3, 4 e 5 sono verticali e la distanza tra loro è  $d$ ; la distanza del secondo dal piano  $d_R$ . Il sistema di riferimento  $Gx'y'z'$ , solidale con il tripletto, ne mostra una generica posizione conseguente ad un insieme di posizioni angolari delle cinque *cammes*.

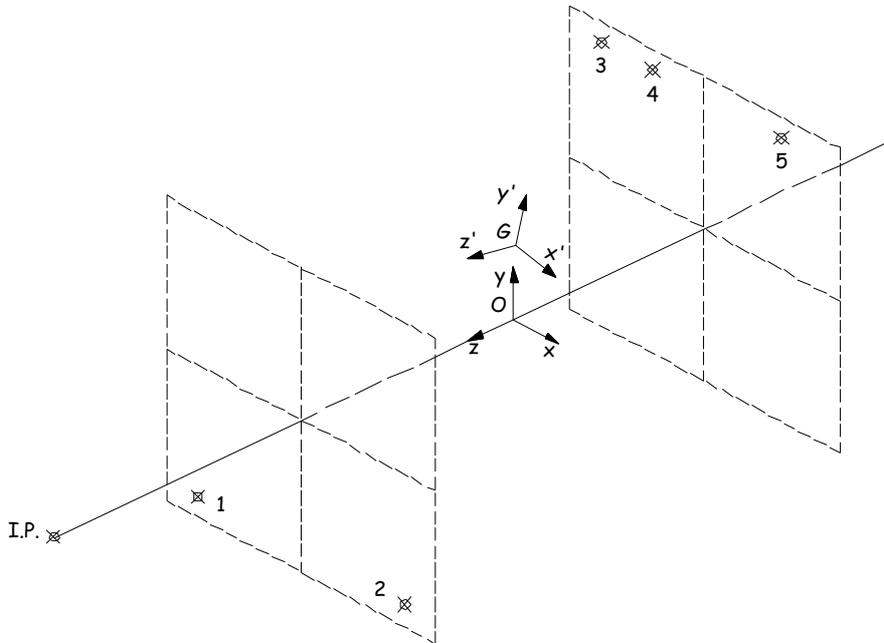


Figura 1

La relazione tra le coordinate cartesiane di uno stesso punto nei due sistemi di riferimento è:

$$1) \quad \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \lambda_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

dove  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  sono i coseni direttori degli angoli definiti dal generico asse  $i$  del sistema  $Gx'y'z'$  rispetto a  $Oxyz$ .

Si può quindi scrivere la relazione inversa

$$2) \quad \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x - x_G \\ y - y_G \\ z - z_G \end{pmatrix}$$

Se la posizione angolare del sistema  $Gx'y'z'$  viene espressa attraverso  $\alpha$  ("roll": rotazione intorno all'asse  $z$ ),  $\varphi$  ("pitch": rotazione intorno all'asse  $x$ ),  $\psi$  ("yaw": rotazione intorno all'asse  $y$ ) e nel caso che  $\varphi$  e  $\psi$  siano piccoli, i coseni direttori valgono:

$$3) \quad \begin{aligned} \alpha_1 &= +\cos\alpha \\ \alpha_2 &= +\sin\alpha \\ \alpha_3 &= -\psi \cdot \cos\alpha + \varphi \cdot \sin\alpha \\ \beta_1 &= -\sin\alpha \\ \beta_2 &= +\cos\alpha \\ \beta_3 &= +\psi \cdot \sin\alpha + \varphi \cdot \cos\alpha \\ \gamma_1 &= +\psi \\ \gamma_2 &= -\varphi \\ \gamma_3 &= 1 \end{aligned}$$

I versi positivi delle tre rotazioni sono quelli orari guardando dall'origine il verso positivo dell'asse a cui si riferiscono.

La figura 2 illustra i parametri che definiscono la posizione della singola *camme*: il punto  $C_i$  è il suo centro di rotazione,  $D_i$  è il centro del cuscinetto a sfere vincolato ad appartenere alla circonferenza di centro  $C_i$  e di raggio  $e$  (eccentricità della *camme*),  $\vartheta_i$  è l'angolo che definisce la posizione angolare della *camme* (la posizione corrispondente al valore zero è quella orizzontale orientata come l'asse  $x$  ed il verso positivo è quello indicato dalla freccia) ed  $E_i$  è il punto di contatto tra cuscinetto di raggio  $r$  e la corrispondente superficie di contatto appartenente al sistema rigido "tripletto".

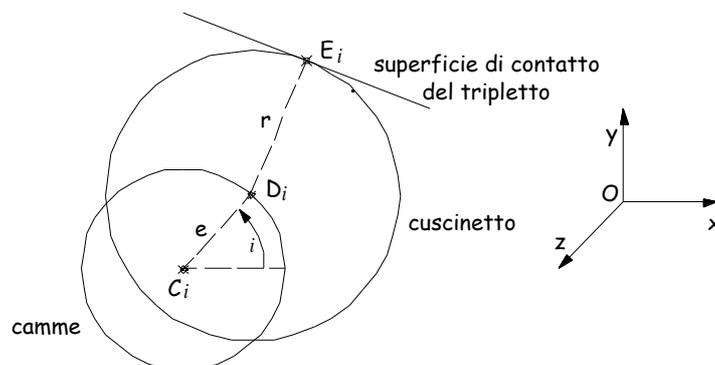


Figura 2

Tale superficie nel caso delle *camme* 1 e 2 è rappresentata, nel piano delle *cammes* stesse, da una circonferenza con centro sull'asse  $z'$  e raggio  $R_F$ , mentre per le 3, 4 e 5 da tre rette di equazione (nel sistema  $Gx'y'z'$ ):

$$4) \quad y' = x' - q(\cos \quad - \sin \quad)$$

$$5) \quad y' = -x' + q(\cos \quad + \sin \quad)$$

$$6) \quad y' = p$$

dove il significato dei parametri  $q$ ,  $\quad$  e  $p$  è illustrato dalla figura 3, nella quale sono rappresentate sulla proiezione lungo l'asse  $z'$  tutte le *cammes*.

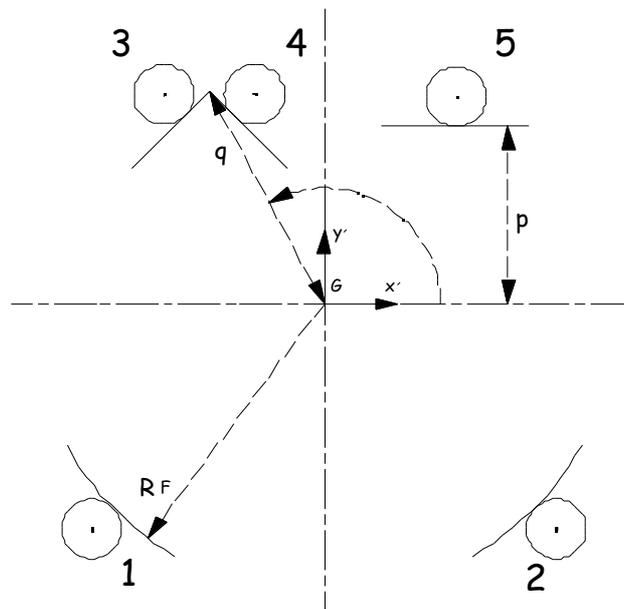


Figura 3

Lo sviluppo analitico prevede due prime fasi uguali per le cinque *cammes*:

1. espressione delle coordinate del punto  $D_i$  nel sistema  $Oxyz$  in funzione di quelle di  $C_i$ :

$$x_{D_i} = x_{C_i} + e \cdot \cos$$

$$7) \quad y_{D_i} = y_{C_i} + e \cdot \sin$$

$$z_{D_i} = z_{C_i}$$

2. espressione delle coordinate del punto  $D_i$  nel sistema  $Gx'y'z'$  in funzione delle coordinate dello stesso punto nel sistema  $Oxyz$ , inglobando le espressioni del punto precedente:

$$8) \quad \begin{aligned} x'_{D_i} &= \alpha_1 (x_{C_i} - x_G + e \cdot \cos \vartheta_i) + \alpha_2 (x_{C_i} - y_G + e \cdot \sin \vartheta_i) + \alpha_3 (x_{C_i} - z_G) \\ y'_{D_i} &= \beta_1 (x_{C_i} - x_G + e \cdot \cos \vartheta_i) + \beta_2 (x_{C_i} - y_G + e \cdot \sin \vartheta_i) + \beta_3 (x_{C_i} - z_G) \end{aligned}$$

Da questo punto in poi lo sviluppo si differenzia.

Camme 1 e 2

Il punto  $D_i$  deve appartenere ad una circonferenza con centro sull'asse  $z'$  e di raggio  $R_F + r$  e quindi per le due camme si ha nell'ordine:

$$9) \quad (x'_{D_1})^2 + (y'_{D_1})^2 - (R_F + r) = 0$$

$$10) \quad (x'_{D_2})^2 + (y'_{D_2})^2 - (R_F + r) = 0$$

Sostituendo nella 9) e nella 10) le 8) si ottengono due equazioni, la prima in  $\vartheta_1$  e la seconda in  $\vartheta_2$ , del tipo:

$$11) \quad C_i - B_i \sin \vartheta_i - A_i \cos \vartheta_i = 0$$

dove i parametri  $A_i$ ,  $B_i$  e  $C_i$  valgono:

$$A_1 = -2e \left[ (x_{C_1} - x_G) \psi(d - d_R) \right]$$

$$B_1 = -2e \left[ (y_{C_1} - y_G) \varphi(d - d_R) \right]$$

$$C_1 = (x_{C_1} - x_G)^2 + (y_{C_1} - y_G)^2 - e^2 - (R_F + r)^2 - 2(d - d_R) \left[ \psi(x_{C_1} - x_G) - \varphi(y_{C_1} - y_G) \right]$$

$$A_2 = -2e \left[ (x_{C_2} - x_G) \psi(d - d_R) \right]$$

$$B_2 = -2e \left[ (y_{C_2} - y_G) \varphi(d - d_R) \right]$$

$$C_2 = (x_{C_2} - x_G)^2 + (y_{C_2} - y_G)^2 - e^2 - (R_F + r)^2 - 2(d - d_R) \left[ \psi(x_{C_2} - x_G) - \varphi(y_{C_2} - y_G) \right]$$

Camme 3

Il punto  $E_3$  coincide con l'intersezione della retta 4) con la sua perpendicolare per  $D_3$ , la cui equazione nel sistema  $Gx'y'z'$  è:

$$12) \quad y' = -x' + (x'_{D_3} + y'_{D_3});$$

e le sue coordinate valgono quindi:

$$13) \quad x'_{E_3} = \frac{1}{2} \left[ g(\cos \delta - \sin \delta) + (x'_{D_3} + y'_{D_3}) \right]$$

$$y'_{E_3} = \frac{1}{2} \left[ g(\cos \delta - \sin \delta) - (x'_{D_3} + y'_{D_3}) \right]$$

Il punto  $E_3$  deve però appartenere anche alla circonferenza di centro  $D_3$  e raggio  $r$  e quindi vale la:

$$14) \quad (x'_{E_3} - x'_{D_3})^2 + (y'_{E_3} - y'_{D_3})^2 - r^2 = 0$$

Sostituendo nella 14) le 13) si ottiene la:

$$15) \quad q(\cos\delta - \sin\delta) - (x'_{D_3} - y'_{D_3}) - \sqrt{2} \cdot r = 0$$

dove il segno dell'ultimo termine è conseguente alla posizione del punto  $D_3$  rispetto alla retta 4).

Sostituendo infine nella 15) le 8) si ottiene una equazione in  $\vartheta_3$  analoga alla 11), nella quale i parametri  $A_3$ ,  $B_3$  e  $C_3$  valgono:

$$A_3 = e(\cos\alpha + \sin\alpha)$$

$$B_3 = -e(\cos\alpha - \sin\alpha)$$

$$C_3 = q(\cos\delta - \sin\delta) - (x_{C_3} - x_G + \psi \cdot d_R)(\cos\alpha + \sin\alpha) + (y_{C_3} - y_G - \varphi \cdot d_R)(\cos\alpha - \sin\alpha) - \sqrt{2} \cdot r$$

#### Camme 4

Il punto  $E_4$  coincide con l'intersezione della retta 5) con la sua perpendicolare per  $D_4$ , la cui equazione nel sistema  $Gx'y'z'$  è:

$$16) \quad y' = -x' - (x'_{D_4} - y'_{D_4});$$

e le sue coordinate valgono quindi:

$$17) \quad \begin{aligned} x'_{E_4} &= \frac{1}{2} [q(\cos\delta + \sin\delta) + (x'_{D_4} - y'_{D_4})] \\ y'_{E_4} &= \frac{1}{2} [q(\cos\delta + \sin\delta) - (x'_{D_4} - y'_{D_4})] \end{aligned}$$

Il punto  $E_4$  deve però appartenere anche alla circonferenza di centro  $D_4$  e raggio  $r$  e quindi vale la:

$$18) \quad (x'_{E_4} - x'_{D_4})^2 + (y'_{E_4} - y'_{D_4})^2 - r^2 = 0$$

Sostituendo nella 18) le 17) si ottiene la:

$$19) \quad q(\cos\delta + \sin\delta) - (x'_{D_4} + y'_{D_4}) + \sqrt{2} \cdot r = 0$$

dove il segno dell'ultimo termine è conseguente alla posizione del punto  $D_4$  rispetto alla retta 5).

Sostituendo infine nella 19) le 8) si ottiene una equazione in  $\vartheta_4$  analoga alla 11), nella quale i parametri  $A_4$ ,  $B_4$  e  $C_4$  valgono:

$$A_4 = e \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)$$

$$B_4 = e \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)$$

$$C_4 = q \cdot (\cos \delta + \sin \delta) - (x_{C_4} - x_G + \psi \cdot d_R) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) - (y_{C_4} - y_G - \varphi \cdot d_R) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) \sqrt{2} \cdot r$$

### Camme 5

Il punto  $E_5$  coincide con l'intersezione della retta 6) con la sua perpendicolare per  $D_5$  e le sue coordinate valgono quindi:

$$20) \quad \begin{aligned} x'_{E_5} &= x'_{D_5} \\ y'_{E_5} &= p \end{aligned}$$

Il punto  $E_5$  deve però appartenere anche alla circonferenza di centro  $D_5$  e raggio  $r$  e quindi vale la:

$$21) \quad (x'_{E_5} - x'_{D_5})^2 + (y'_{E_5} - y'_{D_5})^2 - r^2 = 0$$

Sostituendo nella 21) le 20) si ottiene la:

$$22) \quad p - y'_{D_5} + r = 0$$

dove il segno dell'ultimo termine è conseguente alla posizione del punto  $D_5$  rispetto alla retta 6).

Sostituendo infine nella 22) le 8) si ottiene una equazione in  $\vartheta_5$  analoga alla 11), nella quale i parametri  $A_5$ ,  $B_5$  e  $C_5$  valgono:

$$A_5 = -e \sin \alpha$$

$$B_5 = e \cos \alpha$$

$$C_5 = p + (x_{C_5} - x_G + \psi \cdot d_R) \sin \alpha - (y_{C_5} - y_G - \varphi \cdot d_R) \cos \alpha - r$$

Concludendo, per tutte e cinque le *camme* vale l'equazione 11); come proposto da G. Delle Monache, la sua soluzione deriva dalla:

$$23) \quad \tan \frac{\vartheta_i}{2} = \frac{B_i \pm \sqrt{A_i^2 + B_i^2 - C_i^2}}{A_i \cdot B_i}$$

che risulta in accordo con la simulazione geometrica eseguita con il CAD.

L'uso per del valore approssimato a solo due cifre decimali ha reso però impreciso l'algoritmo realizzato dal collega, non solo dando valori non simmetrici per le varie coppie di  $\vartheta_i$  ma diversi anche di  $1^\circ$  da quelli ottenuti con un maggior numero di cifre decimali (camme 4).

### Uso dell'algoritmo inserito in un foglio di lavoro EXCEL

Il valore dei parametri, corrispondenti alla geometria di progetto del sistema di movimentazione descritto, è ([mm] e [rad]):

$X_{C1}$	-133,64		e	2
$X_{C2}$	133,64		d	984,05
$X_{C3}$	-94,50		$d_R$	492,025
$X_{C4}$	-39,09		$R_F$	171,5
$X_{C5}$	78,67		r	17,5
$Y_{C1}$	-133,64		q	141,04
$Y_{C2}$	-133,64		$\delta$	2,06472
$Y_{C3}$	120,96		p	103,71
$Y_{C4}$	121,14			
$Y_{C5}$	121,14			

Valore dei parametri geometrici

Nel caso di coincidenza dei due sistemi di riferimento  $Oxyz$  e  $Gx'y'z'$  l'algoritmo dà per  $\vartheta_i$  le seguenti soluzioni:

$X_g$	0,00	mm	$\theta_{1+}$	134,8 °	$\theta_{1-}$	-44,8 °
$Y_g$	0,00	mm	$\theta_{2+}$	-135,2 °	$\theta_{2-}$	45,2 °
$\varphi$	0,00	°	$\theta_{3+}$	51,8 °	$\theta_{3-}$	-141,8 °
$\psi$	0,00	°	$\theta_{4+}$	134,7 °	$\theta_{4-}$	-44,7 °
$\alpha$	0,00	°	$\theta_{5+}$	178,0 °	$\theta_{5-}$	2,0 °

Coppie di valori di  $\vartheta_i$  per la coincidenza tra  $Oxyz$  e  $Gx'y'z'$

Si può notare una chiara simmetria tra i due valori di ogni coppia, come risulta da una verifica geometrica effettuata usando il CAD.

Durante il montaggio dei due tripletti nei cilindri di supporto si è verificato che un corretto allineamento magnetico di ciascun tripletto rispetto all'asse meccanico del relativo cilindro comporta per  $x_G, y_G, \varphi, \psi, \alpha$  e quindi per  $\vartheta_i$  i seguenti valori:

$X_g$	-0,24	mm	$\vartheta_{1+}$	120,4 °	$\vartheta_{1-}$	-29,9 °
$Y_g$	0,44	mm	$\vartheta_{2+}$	-164,2 °	$\vartheta_{2-}$	73,9 °
$\varphi$	-0,07	°	$\vartheta_{3+}$	56,5 °	$\vartheta_{3-}$	-145,6 °
$\psi$	-0,01	°	$\vartheta_{4+}$	168,1 °	$\vartheta_{4-}$	-77,2 °
$\alpha$	0,44	°	$\vartheta_{5+}$	165,4 °	$\vartheta_{5-}$	15,4 °

Tripletto del lato di ingresso degli elettroni

$X_g$	-0,02	mm	$\vartheta_{1+}$	127,2 °	$\vartheta_{1-}$	-37,1 °
$Y_g$	0,14	mm	$\vartheta_{2+}$	-136,8 °	$\vartheta_{2-}$	46,6 °
$\varphi$	-0,01	°	$\vartheta_{3+}$	66,2 °	$\vartheta_{3-}$	-154,6 °
$\psi$	0,02	°	$\vartheta_{4+}$	-166,0 °	$\vartheta_{4-}$	-102,3 °
$\alpha$	0,82	°	$\vartheta_{5+}$	141,6 °	$\vartheta_{5-}$	40,1 °

Tripletto del lato di ingresso dei positroni

I due vettori  $V_{elettroni}$  e  $V_{positroni}$ , costituiti dai valori di  $x_G, y_G, \varphi, \psi, \alpha$ , che definiscono la posizione nominale dei tripletti, corrispondono ad una posizione nota delle quattro mire, illustrate dalla figura 4 e solidali ai tripletti stessi:

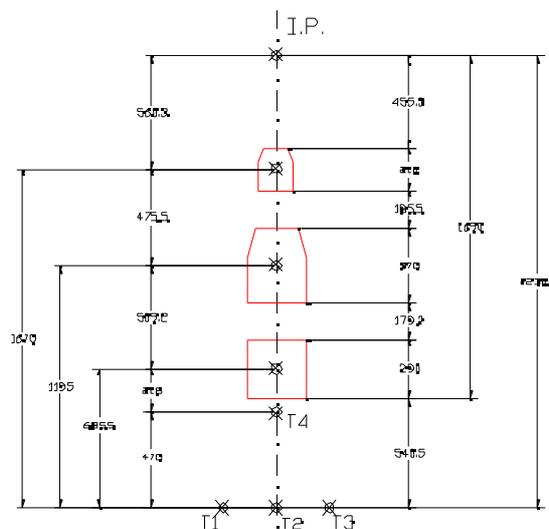


Figura 4

Le coordinate di tali posizioni sono riportate nella tabella che segue:

	lato ingresso elettroni		lato ingresso positroni	
	x	y	x	y
<b>T<sub>1</sub></b>	<b>- 249,99</b>	<b>119,34</b>	<b>248,96</b>	<b>121,06</b>
<b>T<sub>2</sub></b>	<b>2,27</b>	<b>276,82</b>	<b>- 4,15</b>	<b>276,63</b>
<b>T<sub>3</sub></b>	<b>252,01</b>	<b>114,63</b>	<b>- 252,88</b>	<b>112,85</b>
<b>T<sub>4</sub></b>	<b>2,41</b>	<b>276,65</b>	<b>- 4,14</b>	<b>276,47</b>

Tabella 1

dove le coordinate ([mm]) si intendono rispetto ad un sistema di riferimento con origine nell' I.P., asse  $z$  coincidente con l'asse di simmetria dell'apparato di KLOE, l'asse  $x$  orizzontale orientato verso l'esterno della macchina e l'asse  $y$  verticale orientato verso l'alto.

Misurando le coordinate delle 4 mire di ogni tripletto nella attuale posizione e confrontandole con quelle nominali della tabella 1, si potrà ricavare la variazione da apportare ai valori nominali dei due vettori  $V_i$  affinché corrispondano alla posizione attuale. L'algoritmo fornirà quindi i valori di  $\vartheta_i$  che potranno essere messi in relazione con i valori forniti dagli *encoders*, rimontati in posizione arbitraria; sarà quindi possibile mettere in relazione lo zero degli *encoders* con la posizione di zero delle *cammes* ( $\vartheta_i = 0$ ) e, tramite l'*offset* calcolato per ogni *camme*, gestire il movimento del tripletto usando l'algoritmo.

Errata Corrige

Le espressioni che seguono vanno sostituite a quelle inserite nel testo:

$$7) \quad \begin{aligned} x_{D_i} &= x_{C_i} + e \cdot \cos \vartheta_i \\ y_{D_i} &= y_{C_i} + e \cdot \sin \vartheta_i \\ z_{D_i} &= z_{C_i} \end{aligned}$$

$$9) \quad (x'_{D_1})^2 + (y'_{D_1})^2 - (R_F + r)^2 = 0$$

$$10) \quad (x'_{D_2})^2 + (y'_{D_2})^2 - (R_F + r)^2 = 0$$

$$16) \quad y' = x' - (x'_{D_1} - y'_{D_1})$$

$$C_5 = p + (x_{C_5} - x_G + \psi \cdot d_R) \sin \alpha - (y_{C_5} - y_G - \varphi \cdot d_R) \cos \alpha + r$$

Referenze

G. Raffone, "On the triplet support barrel positioning mechanism",  
N.T. ME-3 del 16/4/1993

G. Delle Monache Comunicazioni personali