บทที่ 3

การออกแบบระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์

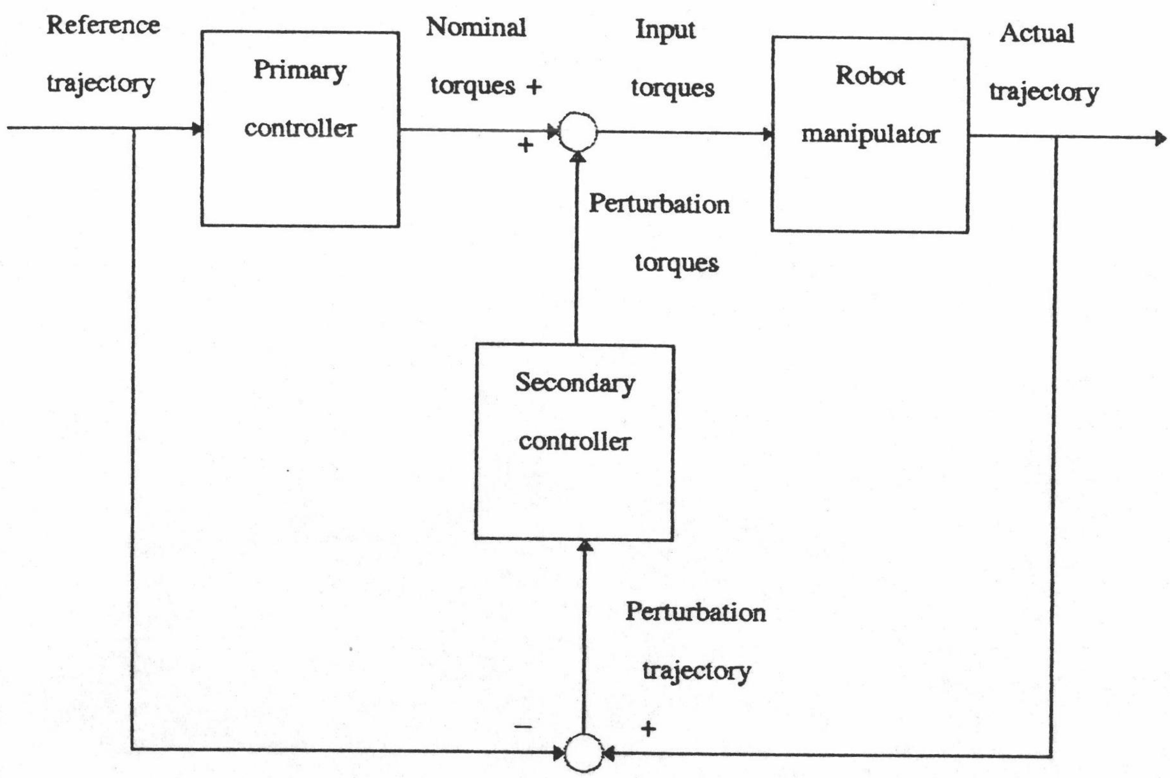
การออกแบบระบบควบคุมในงานวิจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ให้ติดตามเส้นทางอ้างอิงอย่างแม่นยำที่สุด ถึงแม้ว่าอยู่ในสภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง และมีการรบกวนเกิดขึ้นในขณะทำงาน ระบบควบคุมที่ออกแบบเป็นชนิดปรับตัวได้ ออกแบบตามทฤษฎี Perturbation ดังรูปที่ 3.1 จากแนวคิดที่เสนอโดย Lee และ Chung ระบบควบคุมที่ออกแบบตามหลักการนี้มีการคำนึงถึงผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างข้อในขณะเคลื่อนที่ โดยมีหลักการคือ ระบบแขนหุ่นยนต์ซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ถูกทำให้เป็นระบบเชิงเส้น (linearized perturbation system) รอบๆ เส้นทางที่ระบุ ทำให้สามารถแยกระบบควบคุมดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งทำงานเป็นอิสระจากกันและกัน ได้แก่ ตัวควบคุมปฐมภูมิ (pirmary controller) และ ตัวควบคุมทุติยภูมิ (secondary controller)

ตัวควบคุมปฐมภูมิ ทำหน้าที่คำนวณแรงบิดที่ระบุ (nominal torques) เพื่อขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ไปตามเส้นทางที่ระบุ เป็นการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก ผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างข้อตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่

ตัวควบคุมทุติยภูมิ ทำหน้าที่คำนวณแรงบิดเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนของ ตำแหน่ง หรือ ความเร็ว ที่ผิดเพี้ยนไปจากค่าที่ระบุ (purturbation torques) โดยคำนวณจากแบบจำลองเชิงเส้น ที่ได้จากการทำให้ระบบแขนหุ่นยนต์ซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้น เป็นระบบเชิงเส้นรอบๆเส้นทางที่ระบุ

ระบบควบคุมซึ่งออกแบบตามทฤษฎี Perturbation ที่พิจารณา มีดังนี้

1. ระบบควบคุมที่เสนอโดย Lee และ Chung
2. ระบบควบคุมที่เสนอโดย Liu และ Lin
3. ระบบควบคุมที่เสนอโดย Goldenberg et al.
4. ระบบควบคุมที่ออกแบบในงานวิจัย



<u>รูปที่ 3.1</u> ระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์ตามหลักการทฤษฎี Perturbation

1. <u>ระบบควบคุมที่เสนอโดย Lee และ Chung</u>

ระบบควบคุมที่เสนอโดย Lee และ Chung (รูปที่ 3.2) ประกอบด้วย

1.1 ตัวควบคุมปฐมภูมิ ทำหน้าที่คำนวณแรงบิดที่ระบุ จากสมการ Newton-Euler

1.2 ตัวควบคุมทุติยภูมิ ทำหน้าที่คำนวณแรงบิดเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อน จากกฎการควบคุมเชิงเล็งเลิศเป็นช่วงๆ โดยใช้สมการสถานะ (state equations) แทนแบบจำลองแขนหุ่นยนต์ ซึ่งถูกทำให้เป็นเชิงเส้น รอบๆเส้นทางอ้างอิง มีวิธีการดังนี้

จากสมการ Lagrange-Euler ของแขนหุ่นยนต์ N ลิงค์ ดังสมการที่ (2.8) คือ

$$D(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + H(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + G(\mathbf{q}) = \tau(t) \qquad \text{(3.1.1)}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการสถานะ ซึ่งมีรูปทั่วไปคือ

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{f}\left[\mathbf{X}(t),\ \mathbf{U}(t)\right] \qquad \text{(3.1.2)}$$

เมื่อ

$\mathbf{U}(t)$ คือ อินพุทของระบบ

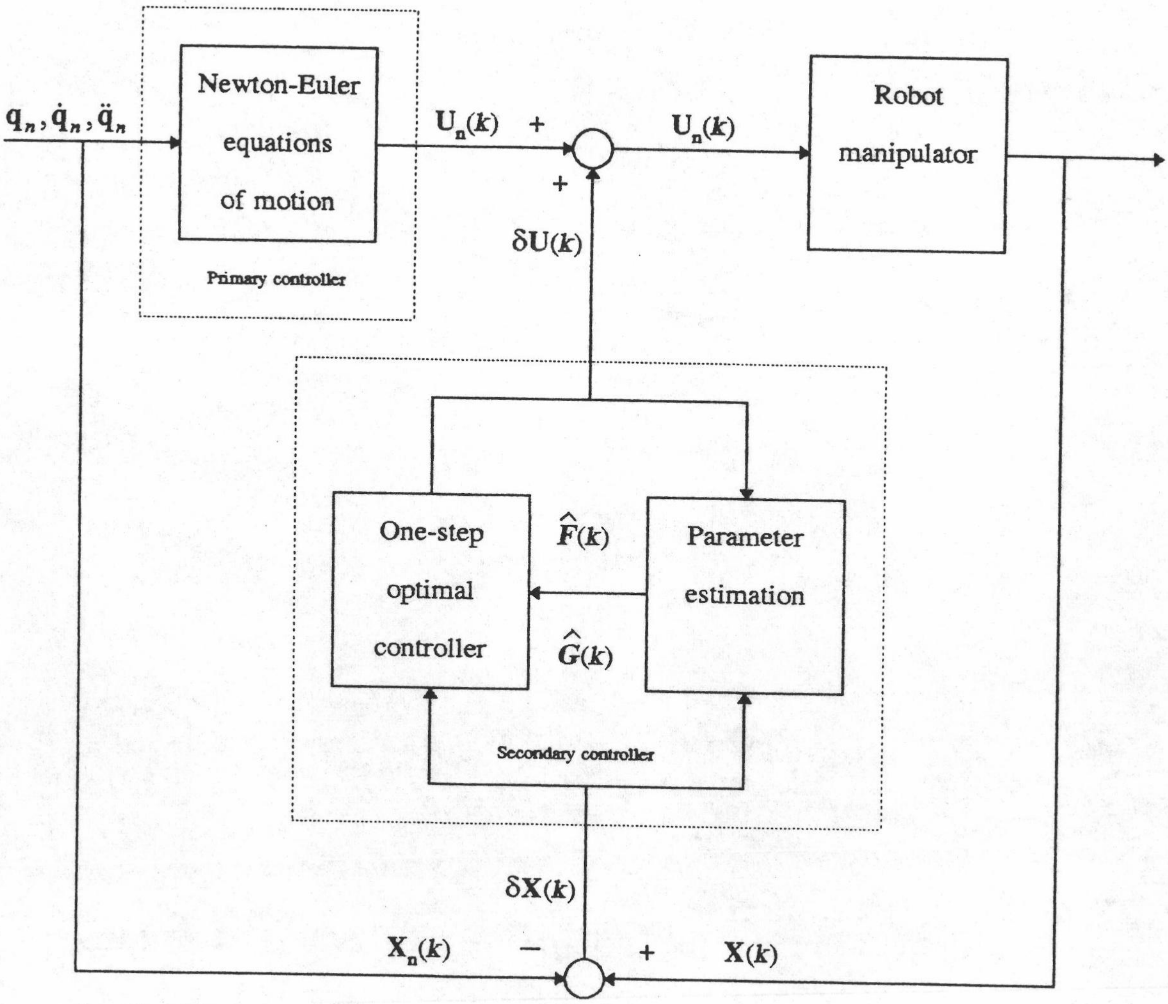
องค์ประกอบ N ตัวแรกคือ $q(t)$ เป็นตำแหน่งของข้อ และองค์ประกอบ N ตัวหลังคือ $\dot{q}(t)$ เป็นความเร็วของข้อ ดังสมการ (3.1.4)

$$\mathbf{X}(t) = \left[x_1(t)\ x_2(t)\ \ldots\ x_{2N}(t)\right]^T$$

$$\triangleq \left[\mathbf{X}_1^T\ \vdots\ \mathbf{X}_2^T\right] \qquad \text{(3.1.3)}$$

$$\mathbf{X}(t) = \left[q_1(t)\ q_2(t)\ \ldots\ q_N(t)\ \vdots\ \dot{q}_1(t)\ \dot{q}_2(t)\ \ldots\ \dot{q}_N(t)\right]^T$$

$$\triangleq \left[\mathbf{q}^T\ \vdots\ \dot{\mathbf{q}}^T\right] \qquad \text{(3.1.4)}$$



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมที่เสนอโดย Lee และ Chung

กำหนดให้ สถานะที่ระบุ (nominal states) $\mathbf{X}_n(t)$ เป็นค่าที่ทราบล่วงหน้า ซึ่งได้จากขั้นตอนวางแผนกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ (path planning) และ $\mathbf{U}_n(t)$ คือ แรงบิดที่ระบุ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ Newton-Euler ดังนั้นสมการสถานะในกรณีที่แขนหุ่นยนต์ เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ระบุโดยไม่ผิดเพี้ยนคือ

$$\dot{\mathbf{X}}_n(t) = \mathbf{f}\left[\mathbf{X}_n(t),\ \mathbf{U}_n(t)\right] \qquad \text{———(3.1.5)}$$

ในกรณีที่ การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์มีการคลาดเคลื่อนไปจากเส้นทางที่ระบุเล็กน้อย สามารถหาสมการสถานะของความคลาดเคลื่อนได้โดย กระจายสมการที่ (3.1.5) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์รอบๆเส้นทางที่ระบุ โดยตัดพจน์ที่มีการแปรผันตั้งแต่อันดับสองขึ้นไปทิ้ง เนื่องจากถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์อันดับหนึ่ง ทำให้ได้แบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$\begin{aligned}\delta\dot{\mathbf{X}}(t) &= \nabla_x \mathbf{f}\big|_n\, \delta\mathbf{X}(t) + \nabla_u \mathbf{f}\big|_n\, \delta\mathbf{U}(t) \\ &= \mathbf{A}(t)\, \delta\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\, \delta\mathbf{U}(t) \qquad \text{———(3.1.6)}\end{aligned}$$

เมื่อ $\nabla_x \mathbf{f}\big|_n$ และ $\nabla_u \mathbf{f}\big|_n$ คือ จาโคเบียน เมตริกซ์ ของ $\mathbf{f}\,[\mathbf{X}(t),\ \mathbf{U}(t)]$ ซึ่งหาค่าที่ $\mathbf{X}_n(t)$ และ $\mathbf{U}_n(t)$ เมตริกซ์พารามิเตอร์ของระบบ คือ $\mathbf{A}(t)$ และ $\mathbf{B}(t)$ มีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่ง และความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตลอดเส้นทางที่ระบุ การหาค่าเมตริกซ์ดังกล่าว โดยวิธีคำนวณหา จาโคเบียนเมตริกซ์โดยตรงเป็นเรื่องยุ่งยาก เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์มีความซับซ้อน จึงต้องใช้วิธีประมาณค่าพารามิเตอร์เป็นช่วงๆ (estimation) ตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่

โดยการดิสครีไทซ์ สมการ (3.1.6) ทำให้ได้สมการสถานะในระบบเชิงเลขดังสมการ (3.1.7) ดังนี้

$$\delta\mathbf{X}[\,(k+1)T\,] = \mathbf{F}[\,(k)T\,]\,\delta\mathbf{X}[\,(k)T\,] + \mathbf{G}[\,(k)T\,]\,\delta\mathbf{U}[\,(k)T\,] \qquad \text{———(3.1.7)}$$

เมื่อ

T คือ คาบเวลาการสุ่ม (sampling period) และ $k = 0, 1, 2, \ldots$

$\delta\mathbf{U}(k)$ คือ เวคเตอร์อินพุทของระบบ ซึ่งมีมิติ 2N และมีค่าคงที่เป็นช่วงๆ (piecewise constant) ระหว่างคาบเวลาการสุ่ม $kT \le t < (k+1)T$

$\delta\mathbf{X}(t)$ คือ เวคเตอร์สถานะของระบบที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้น (perturbed states) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\delta\mathbf{X}(kT) = \Gamma(kT, t_0)\delta\mathbf{X}(t_0) + \int_{t_0}^{kT}\Gamma(kT, t)\mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t)\,dt \qquad (3.1.8)$$

เมื่อ

$\Gamma(kT, t_0)$ คือ เมตริกซ์ state-transition ของระบบ , t_0 คือ เวลาเริ่มต้น

F(kT) และ G(kT) คือ เมตริกซ์พารามิเตอร์ของระบบเชิงเลข ซึ่งมีมิติ $2N \times 2N$ และ $2N \times N$ ตามลำดับ มีค่าดังนี้

$$\mathbf{F}(kT) = \Gamma[(k+1)T, kT]$$
$$\mathbf{G}(kT) = \int_{kT}^{(k+1)T}\Gamma[(k+1)T, t]\mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t)\,dt \qquad (3.1.9)$$

เมตริกซ์ F(kT) และ G(kT) ของแบบจำลองเชิงเส้นตามสมการ (3.1.9) หาค่าได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์เป็นช่วงๆ โดยวิธี recursive least squares ดังนี้ (เพื่อความสะดวกจะใช้สัญญลักษณ์ k แทน kT ต่อไป)

การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธี recursive least squares สำหรับตัวควบคุมทุติยภูมิ ตามวิธีของ Lee และ Chung มีข้อกำหนดคือ

ก. ถือว่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงช้ากว่า ความเร็วในการปรับตัวของระบบควบคุม (adaptation speed)

ข. ถือว่าระบบไม่มี noise

ค. สามารถวัดสถานะของระบบได้ทุกตัว

จัดรูปสมการ (3.1.7) เพื่อความเหมาะสมสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

กำหนดให้

$\theta_i(k)$ เป็นเวคเตอร์แถวที่ i ของเมตริกซ์พารามิเตอร์ [F(k) : G(k)] ซึ่งต้องการประมาณค่า

$$\theta_i^T(k) = [\, f_{i1}(k), f_{i2}(k), \ldots, f_{ip}(k), g_{i1}(k), g_{i2}(k), \ldots, g_{iN}(k) \,] \quad i = 1, 2, \ldots, p$$

เมื่อ $p = 2N$

(3.1.10)

หรืออยู่ในรูปเมตริกซ์ คือ

$$\Theta(k) = \begin{bmatrix} f_{11}(k) & f_{21}(k) & \cdots & f_{p1}(k) \\ f_{12}(k) & f_{22}(k) & \cdots & f_{p2}(k) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f_{1p}(k) & f_{2p}(k) & \cdots & f_{pp}(k) \\ g_{11}(k) & g_{21}(k) & \cdots & g_{p1}(k) \\ g_{12}(k) & g_{22}(k) & \cdots & g_{p2}(k) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ g_{1N}(k) & g_{2N}(k) & \cdots & g_{pN}(k) \end{bmatrix} \quad \text{\_\_\_\_(3.1.11)}$$

$$= [\ \theta_1(k)\ ,\ \theta_2(k)\ , \ldots,\ \theta_p(k)\ ]$$

และกำหนดเวคเตอร์ $\alpha(k)$ ซึ่งมีมิติ 3N เป็นเวคเตอร์ของค่าที่วัดได้ (measurement vector) ได้แก่ ตัวแปรสถานะ และ อินพุทของระบบ ดังนี้

$$\alpha^T(k) = [\ x_1(k), x_2(k), \ldots x_p(k), u_1(k), u_2(k), \ldots u_N(k)\ ] \quad \text{\_\_\_\_(3.1.12)}$$

เมื่อแทนค่า $\alpha(k)$ และ $\theta_i(k)$ ในสมการ (3.1.7) จะได้สมการในรูป

$$x_i(k+1) = \alpha^T(k)\,\theta_i(k) \qquad i = 1, 2, \ldots, p \quad \text{\_\_\_\_(3.1.13)}$$

ทำให้สามารถประมาณค่าเวคเตอร์ $\theta_i(k)$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของระบบเชิงเส้น ตามวิธี recursive least squares จากสมการดังต่อไปนี้

$$\hat{\theta}_i(k+1) = \hat{\theta}_i(k) + \gamma(k)\mathbf{P}(k)\alpha(k)\left[x_i(k+1) - \alpha^T(k)\hat{\theta}_i(k)\right]$$

$$\mathbf{P}(k+1) = \mathbf{P}(k) - \gamma(k)\mathbf{P}(k)\alpha^T(k)\mathbf{P}(k)$$

$$\gamma(k) = \left[\rho + \alpha^T(k)\mathbf{P}(k)\alpha(k)\right]^{-1} \qquad \text{เมื่อ } 0.9 \le \rho < 1$$

$$\text{\_\_\_\_(3.1.14)}$$

ตามปกติเมื่อใช้วิธีประมาณค่าพารามิเตอร์ จะไม่ทราบค่าเริ่มต้นของ เมตริกซ์ $\mathbf{P}(k)$ และเวคเตอร์ $\theta_i(k)$ จำเป็นต้องเดาค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม โดยทั่วไปอาจกำหนดค่า $\mathbf{P}(0) = \sigma \mathbf{I}_{3N}$ เมื่อ $\mathbf{I}_{3N}$ คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) และ σ คือ ปริมาณสเกลาร์ที่มีค่ามาก

พารามิเตอร์ $\hat{\mathbf{F}}(k)$ และ $\hat{\mathbf{G}}(k)$ ที่ได้จากการประมาณค่า จะนำไปคำนวณแรงบิด $\delta U(k)$ โดยใช้กฎการควบคุมเชิงเล็งเลิศเป็นช่วงๆ จากการทำให้ดรรชนีสมรรถนะ J มีค่าน้อยที่สุด โดยที่

$$J(k) = \frac{1}{2}[\ \delta\mathbf{X}^{T}(k+1)\ \mathbf{Q}\ \delta\mathbf{X}(k+1) + \delta\mathbf{U}^{T}(k)\ \mathbf{R}\ \delta\mathbf{U}(k)\ ] \qquad (3.1.15)$$

เมื่อ

$\mathbf{Q}_{pxp}$ และ $\mathbf{R}_{mxm}$ คือ เมตริกซ์น้ำหนักถ่วง (weighting matrices) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์กึ่งสมมาตรบวก (positive semidefinite matrix) และเมตริกซ์สมมาตรบวก ตามลำดับ ทำให้ได้ $\delta\mathbf{U}^{*}(k)$ เป็นค่าเชิงเลิงเลิศ มีค่าดังนี้

$$\delta\mathbf{U}^{*}(k) = -\left[\mathbf{R} + \hat{\mathbf{G}}^{T}(k)\mathbf{Q}\hat{\mathbf{G}}(k)\right]^{-1}\hat{\mathbf{G}}^{T}(k)\mathbf{Q}\hat{\mathbf{F}}(k)\mathbf{X}(k) \qquad (3.1.16)$$

2. <u>ระบบควบคุมที่เสนอโดย Liu และ Lin</u>

Liu และ Lin เสนอระบบควบคุมชนิดปรับตัวได้ ดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย

2.1 ตัวควบคุมปฐมภูมิ ทำหน้าที่คำนวณแรงบิดที่ระบุ $\mathbf{U}_n(k)$ จากสมการ Newton-Euler เพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของแขนหุ่นยนต์

2.2 ตัวควบคุมทุติยภูมิ ทำหน้าที่คำนวณแรงบิด $\delta\mathbf{U}(k)$ เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนรอบๆ เส้นทางที่ระบุ ด้วยวิธี generalized minimum variance control โดยใช้แบบจำลองชนิด multiple-input multiple-output (MIMO) แทนระบบที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นของแขนหุ่นยนต์ ดังนี้

$$\mathbf{A}(z^{-1})\delta\mathbf{Y}(k) = \mathbf{B}(z^{-1})\delta\mathbf{U}(k) + \mathbf{C}(z^{-1})\xi(k) \qquad (3.2.1)$$

โดยที่

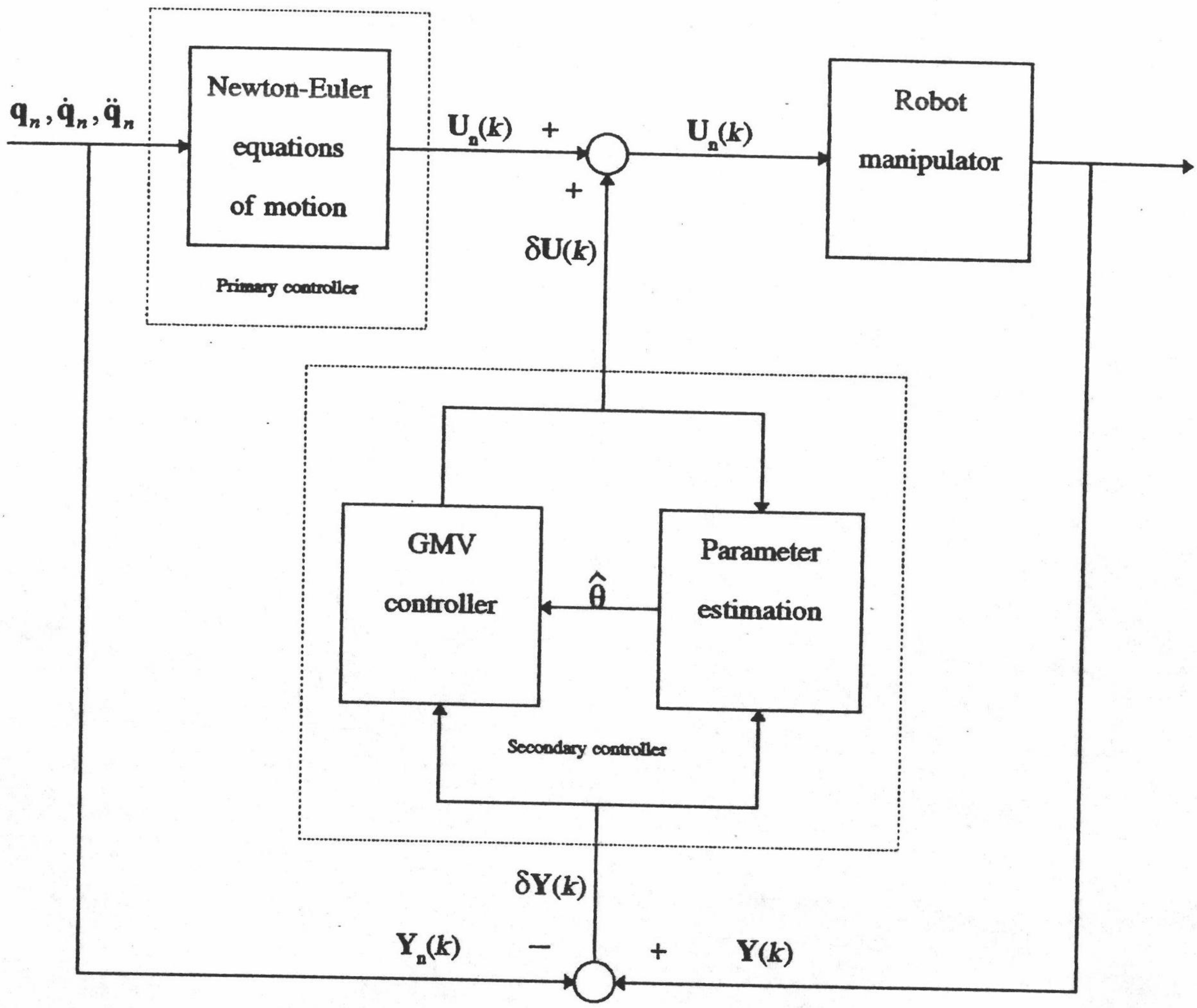
$\delta\mathbf{Y}(k)$ คือ เวคเตอร์เอาท์พุทของระบบ ซึ่งมีมิติ N เป็นความคลาดเคลื่อนจากเส้นทางที่ระบุ

$\delta\mathbf{U}(k)$ คือ เวคเตอร์อินพุทของระบบซึ่งมีมิติ N เป็นแรงบิดเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนรอบๆเส้นทางที่ระบุ

$\xi(k)$ คือ เวคเตอร์ของ zero-mean white noise process ซึ่งมีมิติ N

z^{-1} คือ backward shift operator มีคุณสมบัติดังนี้ $z^{-1}c(k) = c(k-1)$

เนื่องจากสามารถเปลี่ยน (transform) $\mathbf{A}(z^{-1})$ ให้เป็นเมตริกซ์เฉียง (diagonal matrix) ได้เสมอ (Deng et al., 1991) ทำให้สามารถเปลี่ยนระบบ MIMO ในสมการ (3.2.1) เป็นระบบย่อยแบบ multiple-input single-output (MISO) จำนวน N สมการ ดังสมการ (3.2.2)



รูปที่ 3.3 ระบบควบคุมที่เสนอโดย Liu และ Lin

$$A_i(z^{-1})\delta y_i(k) = z^{-m_i} B_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{N} z^{-1} B_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k) + \xi_i(k)$$

$$i, j = 1, 2, \ldots, N \qquad (3.2.2)$$

เมื่อ

$$A_i(z^{-1}) = 1 + a_i^1 z^{-1} + a_i^2 z^{-2} + \cdots + a_i^{Nai} z^{-Nai}$$

$$B_i(z^{-1}) = b_i^0 + b_i^1 z^{-1} + \cdots + b_i^{Nbi} z^{-Nbi}$$

$$B_{ij}(z^{-1}) = b_{ij}^0 + b_{ij}^1 z^{-1} + \cdots + b_{ij}^{Nbij} z^{-Nbij}$$

ตัวควบคุมทุติยภูมิคำนวณแรงบิด $\delta u_i(k)$ ซึ่งทำให้ครรชนีสมรรถนะ J_i มีค่าน้อยที่สุด เมื่อ

$$J_i \;=\; E\left\{ \left[R_i(z^{-1})\,\delta y_i(k+d_i)\right]^2 \;+\; \left[W_i'(z^{-1})\,\delta u_i(k)\right]^2 \right\} \qquad \text{\_\_\_\_\_(3.2.3)}$$

โดยที่

E คือ expectation operator

d คือ เลขจำนวนเต็มที่แสดงว่า เวลาหน่วง (time delay) ของระบบ เป็นจำนวนกี่เท่าของคาบเวลาการสุ่ม (sampling period) โดยที่เวลาหน่วงของระบบมีค่าเท่ากับ dT เมื่อ T คือคาบเวลาการสุ่ม

$R(z^{-1})$, $W(z^{-1})$ คือ โพลิโนเมียลของน้ำหนักถ่วง โดยที่ $r_i^0 = 1$

การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมซึ่งทำให้ ครรชนีสมรรถนะ J_i มีค่าน้อยที่สุด ทำได้โดยกำหนดระบบช่วย (auxiliary system)

$$\phi_i(k+d_i) \;=\; R_i(z^{-1})\,\delta y_i(k+d_i) \;+\; W_i(z^{-1})\,\delta u_i(k) \qquad \text{\_\_\_\_\_(3.2.4)}$$

และกำหนดเอกลักษณ์ (identity)

$$R_i(z^{-1}) \;=\; A_i(z^{-1})\,F_i(z^{-1}) \;+\; z^{-d_i}G_i(z^{-1}) \qquad \text{\_\_\_\_\_(3.2.5)}$$

เมื่อ

$$W_i(z^{-1}) \;=\; \frac{w_0'^{i}W_i'(z^{-1})}{b_i^0} \qquad \text{\_\_\_\_\_(3.2.6)}$$

$F_i(z^{-1})$ เป็นโพลิโนเมียลซึ่งมีอันดับ $N_{F_i} = d_i - 1$ โดยที่ $f_i^0 = 1$

$G_i(z^{-1})$ เป็นโพลิโนเมียลซึ่งมีอันดับ $N_{G_i} = N_{A_i} - 1$

จากสมการ (3.2.2), (3.2.4) และ (3.2.5) จะได้

$$\begin{aligned} R_i(z^{-1})\delta y_i(k+d_i) \;&=\; F_i(z^{-1})B_i(z^{-1})\delta u_i(k) \;+\; \sum_{\substack{i=1\\ i\neq j}}^{N} H_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k+d_i-d_{ij}) \\ &\quad+\; G_i(z^{-1})\delta y_i(k) \;+\; F_i(z^{-1})\xi_i(k+d_i) \end{aligned}$$

$$\text{\_\_\_\_\_(3.2.7)}$$

$$\phi_i(k+d_i) = H_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \sum_{\substack{i=1\\ i\neq j}}^{N} H_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k+d_i-d_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) + F_i(z^{-1})\xi_i(k+d_i)$$

_____(3.2.8)

เมื่อ

$$H_i(z^{-1}) = F_i(z^{-1})B_i(z^{-1}) + W_i(z^{-1})$$
$$H_{ij}(z^{-1}) = F_i(z^{-1})B_{ij}(z^{-1})$$

แทนค่าสมการ (3.2.7) ในสมการ (3.2.3) จะได้กฎการควบคุมเชิงเส้นเลิศ ซึ่งทำให้ดรรชนีสมรรถนะ J_i มีค่าต่ำสุด ดังนี้

$$H_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \sum_{\substack{i=1\\ i\neq j}}^{N} H_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k+d_i-d_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) = 0$$

_____ (3.2.9)

กฎการควบคุมเชิงเส้นเลิศที่ได้ตามสมการ (3.2.9) จะเป็นกฎการควบคุมเชิงเส้นเลิศของระบบช่วยตามสมการ (3.2.4) เช่นเดียวกัน ซึ่งทำให้ดรรชนีสมรรถนะ I_i มีค่าต่ำสุด
โดยที่

$$I_i = E\{\phi_i^2(k+d_i)\}$$ _____(3.2.10)

การหาพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ทำได้โดยใช้วิธีประมาณค่าเช่นเดียวกับระบบควบคุมของ Lee และ Chung มีวิธีการดังต่อไปนี้

จัดรูปเวคเตอร์สำหรับการประมาณค่า พารามิเตอร์ของระบบควบคุม ได้แก่ โพลิโนเมียล $H_i(z^{-1})$, $H_{ij}(z^{-1})$ และ $G_i(z^{-1})$ ดังนี้

$$\phi_i(k) = R_i(z^{-1})\delta y_i(k) + W_i(z^{-1})\delta u(k-d_i)$$ _____(3.2.11)

$$\begin{aligned}\alpha_i^T(k-d_i) = [&\delta u_i(k-d_i),\ \delta u_i(k-d_i-1),\cdots;\\ &\delta u_1(k-d_{i1}),\ \delta u_1(k-d_{i1}-1),\cdots;\cdots;\\ &\delta u_{i-1}(k-d_{ii-1}),\ \delta u_{i-1}(k-d_{ii-1}-1),\cdots;\\ &\delta u_{i+1}(k-d_{ii+1}),\ \delta u_{ii+1}(k-d_{ii+1}-1),\cdots;\cdots;\\ &\delta u_N(k-d_{iN}),\ \delta u_N(k-d_{iN}-1),\cdots;\\ &\delta y_{i1}(k-d_i),\ \delta y_{i1}(k-d_i-1),\cdots]^T\end{aligned}$$

_____(3.2.12)

และ

$$\theta_i \quad = \quad \left[h_i^0, h_i^1, \cdots; h_{i1}^0, h_{i1}^1, \cdots; \cdots; h_{ii-1}^0, h_{ii-1}^1, \cdots; h_{ii+1}^0, h_{ii+1}^1, \cdots; \cdots; h_{iN}^0, h_{iN}^1, \cdots; g_i^0, g_i^1, \cdots\right]^T$$

_____(3.2.13)

เมื่อ α_i คือ เวคเตอร์ของอินพุท-เอาท์พุทที่วัดค่าได้

θ_i คือ เวคเตอร์พารามิเตอร์ของตัวควบคุมทุติยภูมิ ซึ่งต้องการประมาณค่า

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังกล่าว คำนวณได้จากสมการ (3.2.14) ดังนี้

$$\hat{\theta}_i(k) \quad = \quad \hat{\theta}_i(k-1) \quad + \quad \gamma_i(k)\mathbf{P}_i(k-1)\alpha_i(k-d_i)\left[\phi_i(k) - \alpha_i^T(k-d_i)\hat{\theta}_i(k-1)\right]$$

$$\mathbf{P}_i(k) \quad = \quad \mathbf{P}_i(k-1) \quad - \quad \gamma_i(k)\mathbf{P}_i(k-1)\alpha_i{}^T(k-d_i)\mathbf{P}_i(k-1)$$

$$\gamma_i(k) \quad = \quad \left[\rho \quad + \quad \alpha_i^T(k-d_i)\mathbf{P}_i(k-1)\alpha_i(k-d_i)\right]^{-1} \qquad \text{เมื่อ} \quad 0.9 \le \rho < 1$$

_____(3.2.14)

3. <u>ระบบควบคุมที่เสนอโดย Goldenberg et al.</u>

Goldenberg et al. ปรับปรุงระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์ของ Lee และ Chung โดยเปลี่ยนแปลงตัวควบคุมปฐมภูมิ จากการคำนวณแรงบิดโดยใช้สมการ Newton-Euler มาใช้วิธีคำนวณแรงบิดในรูปพารามิเตอร์ (รูปที่ 3.4) เนื่องจากการคำนวณแรงบิดจากสมการของ Newton-Euler จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์พลวัต (dynamic parameter) ที่แน่นอนล่วงหน้า ได้แก่ มวล ความยาว และ โมเมนต์ความเฉื่อยเป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในขณะทำงาน จึงทำให้ พารามิเตอร์พลวัตของแขนหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมปฐมภูมิซึ่งคำนวณแรงบิดที่ระบุจากสมการ Newton-Euler เป็นการคำนวณแรงบิดในสภาวะไม่มีโหลด ทำให้แรงบิดที่คำนวณได้ ไม่สามารถขับเคลื่อนแขนไปตามเส้นทางอ้างอิงได้อย่างแม่นยำ

การจัดพารามิเตอร์จากสมการ Lagrange-Euler สำหรับแขนหุ่นยนต์ N ข้อ ตามหลักการของ Goldenberg et al. มีวิธีจัดพารามิเตอร์ให้อยู่ในรูปของ dynamics operator ดังนี้

จากสมการพลวัตของ Lagrange-Euler ในรูปเมตริกซ์ ดังสมการ (2.8) คือ

$$D(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + H(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + G(\mathbf{q}) = \tau(t) \qquad \text{\_\_\_\_(3.3.1)}$$

สามารถจัดให้อยู่ในรูปของ $\mathbf{A}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ ดังนี้

$$\tau = \mathbf{A}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\mathbf{z} \qquad \text{\_\_\_\_(3.3.2)}$$

เมื่อ

τ คือ เวคเตอร์แรงหรือแรงบิดของข้อ

Z คือ เวคเตอร์ augmented joint coordinates มีค่าดังนี้

$$\mathbf{z}^T = \left(\ddot{\mathbf{q}}^T\ \dot{\mathbf{q}}^T\ \tilde{\mathbf{q}}^T\ 1\right) \qquad \text{\_\_\_\_(3.3.3)}$$

เมื่อ

$\ddot{\mathbf{q}}(t)$ คือ เวคเตอร์ความเร่งของข้อ

$\dot{\mathbf{q}}(t)$ คือ เวคเตอร์ความเร็วของข้อ

1 คือ ค่าคงที่ซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์

และ

$\tilde{\mathbf{q}}(t)$ คือ เวคเตอร์ขยาย (extented vector) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\tilde{\mathbf{q}}^T(t) = \left(\tilde{\mathbf{q}}_1^T(t)\ \tilde{\mathbf{q}}_2^T(t)\ \cdots\ \tilde{\mathbf{q}}_N^T(t)\right) \qquad \text{\_\_\_\_(3.3.4)}$$

เมื่อ

$$\tilde{\mathbf{q}}_i = \begin{cases} \sin\theta_i & \\ \cos\theta_i & \text{สำหรับข้อแบบเคลื่อนที่เชิงมุม}, \quad i = 1,2,\ldots,N \\ & \\ d_i & \text{สำหรับข้อแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น} \end{cases}$$

โดยที่

θ_i คือ มุมของข้อ i

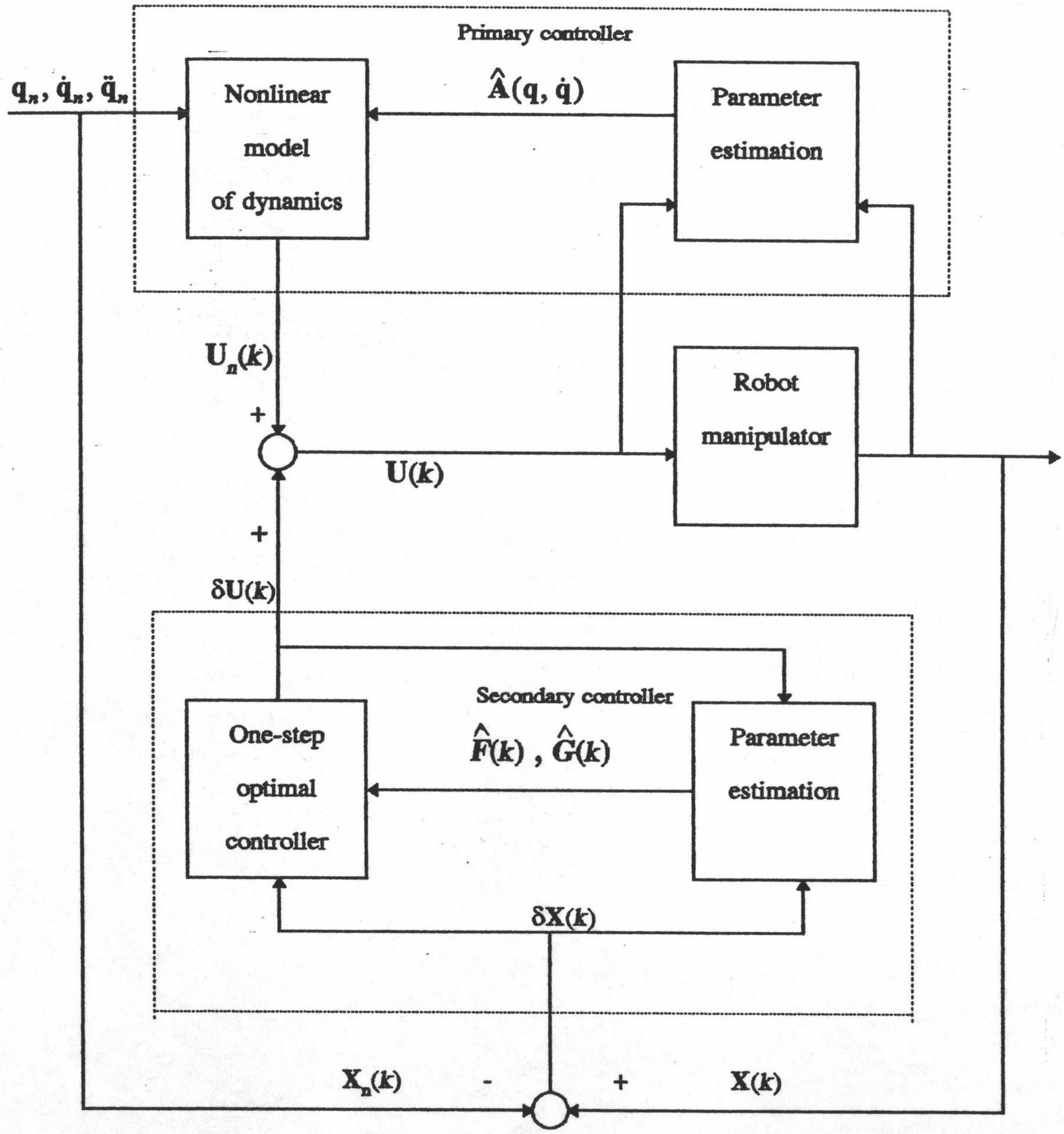
d_i คือ การขจัด (displacement) ของข้อ i

เมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ ตามสมการ (3.3.2) หาค่าได้โดยการประมาณค่าเป็นช่วงๆ จากสมการ (3.1.14) เช่นเดียวกับการประมาณค่าสมการสถานะตามวิธีของ Lee และ Chung โดยเทียบตัวแปรดังนี้

$\tau_i \Rightarrow x_i$

$A \Rightarrow \theta$

และ $Z \Rightarrow \alpha$



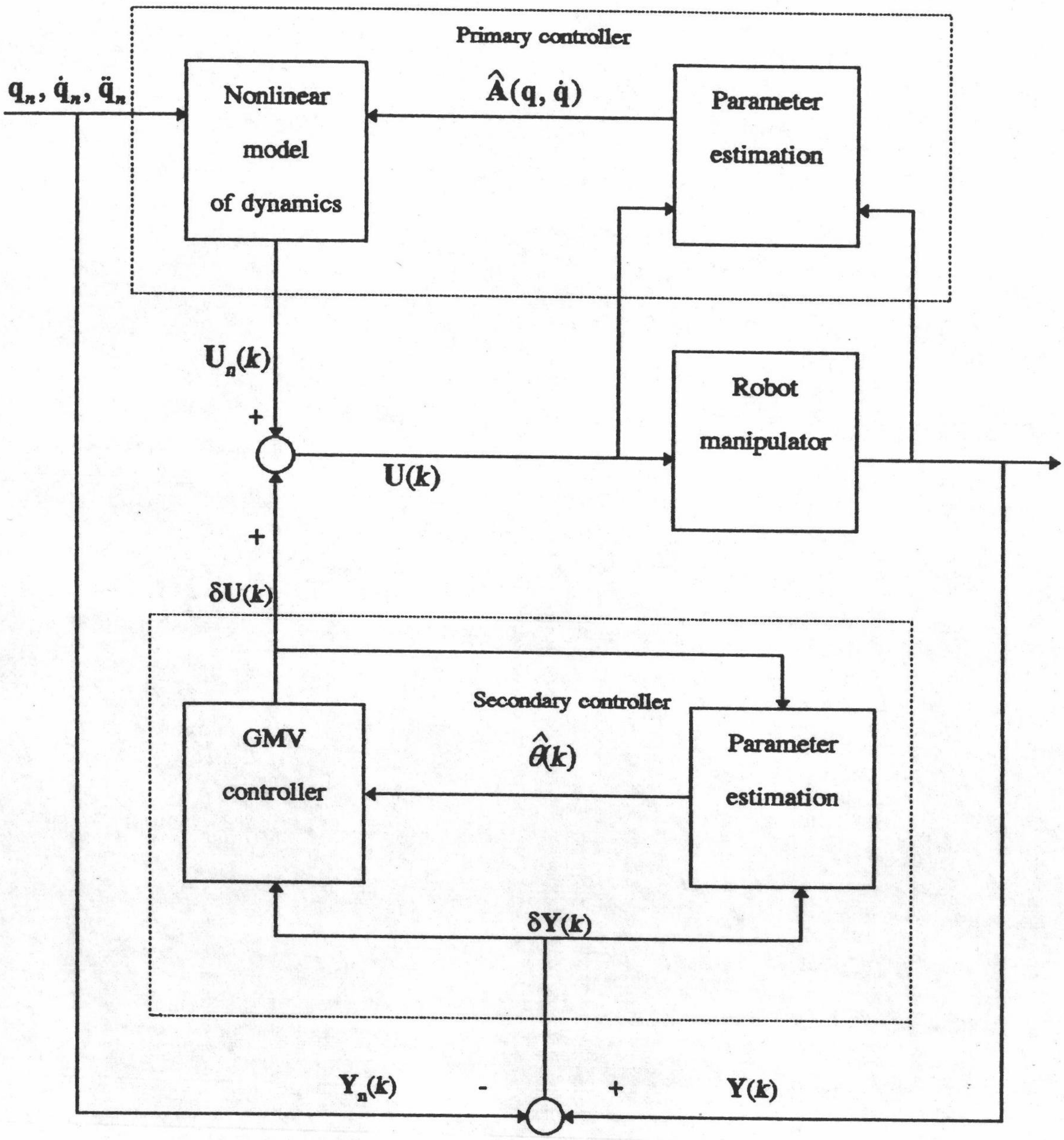
รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมที่ออกแบบโดย Goldenberg et al.

หลังจากได้ค่าเมตริกซ์ $\hat{A}(q, \dot{q})$ จากการประมาณค่าแล้ว สามารถคำนวณแรงบิดที่ระบุ τ_n ตามสมการ (3.3.2) เพื่อขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ไปยัง ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งที่ต้องการ ได้โดยกำหนดเวคเตอร์ Z ให้มีค่าดังนี้

$$z^T = \left(\ddot{q}_n^{\,T}\ \dot{q}_n^{\,T}\ \tilde{q}_n^{\,T}\ 1\right) \qquad \text{(3.3.5)}$$

เมื่อ $\ddot{q}_n$, $\dot{q}_n$ และ $\tilde{q}_n$ คือ ค่าที่ระบุ ซึ่งเป็น ความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่งอ้างอิง (reference trajectory)

ที่มาของ dynamics operator $\mathbf{A}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ตามสมการ (3.3.2) พิจารณาได้จากสมการพลวัต Lagrange-Euler สำหรับแขนหุ่นยนต์ N ข้อ รายละเอียดดูได้จากภาคผนวก ข.



รูปที่ 3.5 ระบบควบคุมที่ออกแบบในงานวิจัย

4. <u>ระบบควบคุมที่ออกแบบในงานวิจัย</u>

ระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์ในงานวิจัย ดังรูปที่ 3.5 ออกแบบตามหลักการของทฤษฎี Perturbation ดังกล่าวมาแล้ว ตัวควบคุมปฐมภูมิ ใช้หลักการจัดพารามิเตอร์ตามวิธีของ Goldenberg et al. ตัวควบคุมทุติยภูมิ ออกแบบตามวิธี generalized minimum variance control