IJEIT
المجـلـة الدوليـة للهندســـة وتقنيـــة المعلومــات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly
جامعة مصراتة MISURATA UNIVERSITY

تقدير الحالات و المعاملات الفيزيائية لنظام ديناميكيات الكاحل البشري

أ. أسماء محمد السويحلي
جامعة المرقب، تقنية المعلومات، الخمس، ليبيا
asmaeswehli@yahoo.de

د.عزالدين احمد الصغير
جامعة المرقب، الهندسة الكهربية والحاسوب، الخمس، ليبيا
izziddien@yahoo.de

الملخص— **تتناول هذه الورقة التقدير المثالي لحالات و معاملات نظام ديناميكيات الكاحل البشري، حيث تم العمل على النموذج الرياضي لهذا النظام من بعد تحويره و تمثيله بنموذج فضاء الحالة و أخيرا تم استخدام طريقتي التعريف التاليتين للتقديرالمثالي لكل حالات ومعاملات النظام والمقارنة بين نتائجهما. الطريقة الأولى هي مرشح كالمان الممدد (Extended Kalman Filter) وفيها استخدم مرشح كالمان لتقدير حالات و معاملات النظام في نفس الوقت حيث تم تمديد حالات النظام الى معاملاته و من تم تقديرها كثوابث، و لان بعد التمديد يصبح النظام غير خطي و قابلية المراقبة غير متاحة لهذا توجب تقريب نموذج المراقب الى نظام خطي حول نقاط تشغيل حالات و معاملات النظام المراد مراقبتها. الطريقة الثانية هي طريقة خطأ التنبؤ التكراري (Recursive - Prediction Error) و فيها تم استخدام مرشح كالمان كمراقب لحالات النظام بينما معاملات النظام تم تقديرها بأستخدام خوارزميات (جاوس- نيوتن) و من ثم ارسالها الى المراقب (مرشح كالمان) و هو بدوره يقدر حالات النظام و يرسلها في نفس الوقت الى خوارزميات (جاوس- نيوتن) و تستمر هذه العملية الى أن يصل مجموع مربع خطأ التقدير الى الحد الأدنى.**

الكلمات المفتاحية: **ديناميكيات مفصل الكاحل البشري** (Human Ankle – Dynamics) ، **مرشح كالمان** (Kalman Filter) ، **تعريف النظم** (System Identification) ، **تقدير الحالات و المعاملات** (State – and Parameter Estimation) ، **طريقة جاوس - نيوتن التكرارية** (Recursive Gauss-Newton Method).

1 . المقدمة

يعتبر تقدير الحالات والمعاملات الفيزيائية مشكلة في الميكترونيك الحيوية والتي تشمل جوانب الحركة والكشف عن الأشارات الحيوية، وفي الميكترونيك الطبية التكيفية و الميكانيكا الحيوية و محاكاتها ، وكذلك في التفاعل بين الأنسان والالة. وركز هذا البحث على مشكلة تقدير الحالات و المعاملات الفيزيائية لديناميكيات الكاحل البشري، حيث تم اعتبار نموذج ديناميكيات الكاحل على أنه نموذج (NARMAX) كما في [1] والذي حددت معاملاته بأستخدام (-Extended Least Squares)، ومع أن نموذج (NARMAX) قدم في الزمن المتقطع تنبؤ ممتاز، ولاكن كان ليس من السهل تحويل معاملاته مرة أخرى الى الزمن المستمر، و لهذا تم التعامل مع نظام ديناميكيات الكاحل في هذا العمل على أنه نظام هجين، و الذي تكون فيه ديناميكيات النظام في الزمن المستمر بينما القياس في الزمن المتقطع.

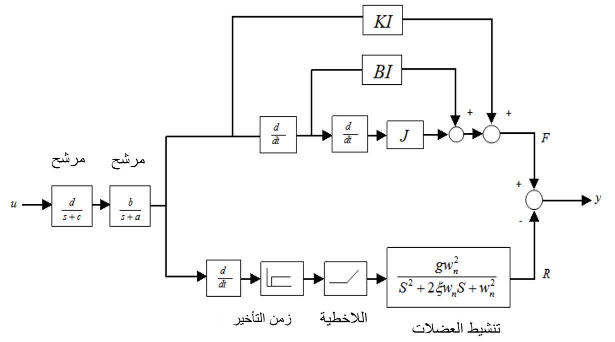
استلمت الورقة بالكامل في 27 اكتوبر 2020 وروجعت في 20 مارس 2021
وقبلت للنشر في 12 ابريل 2021،
ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 13 ابريل 2021.

حيث سيوضح الجزء الثاني من هذا البحث عملية تحوير النموذج الرياضي لنظام ديناميكيات الكاحل وتمثيل نموذج النظام بنموذج فضاء الحالة. والجزء الثالث من البحث سيوضح عملية تقدير حالات ومعاملات النظام باستخدام مرشح كالمان الممدد (Extended Kalman Filter) ، حيث أن في [11] تم استخدام مرشح كالمان الممدد لتقدير القيمة المثالية للمقاومة الميكانيكية للكاحل البشري أثناء الوقوف، بينما في [12] تم استخدامه لتقدير المعاملات الميكانيكية الحيوية لعضلات مفصل الكاحل وفي [13] أستخدم لتقدير الحالات و معامل رد الفعل الأرضي لنظام روبوت يحاكي حركة الورك والفخذ للانسان مع الساق الاصطناعية،

و كذالك يوضح الجزء الثالث من هذا البحث استخدام طريقة خطأ التنبؤ التكراري (Recursive Prediction Error) لتقدير حالات و معاملات نظام ديناميكيات الكاحل البشري و ذالك بأستخدام مرشح كالمان كمراقب ، حيث تعتبر طريقة خطأ التنبؤ التكراري بديلا لمرشح كالمان الممدد و يمكن تطبيقها على نموذج من أي درجة كما في مرشح كالمان الممدد الا أنها أبسط من حيث الاستخدام. وتعتبر كلتا طريقتي التعريف المذكورتان تكراريتان (recursive) و متكيفتان (adaptive) ، ولان نظام ديناميكيات الكاحل نظام تكراري (recursive system) تم أستخدام الطرق التكرارية المذكورة و تطبيقها في هذا البحث (online). و سيعرض الجزء الرابع التجارب الاختبارية و تحليل النتائج، و الجزء الخامس يتضمن الأستنتاج، أما الجزء السادس يتضمن قائمة المراجع المستخدمة في هذا البحث.

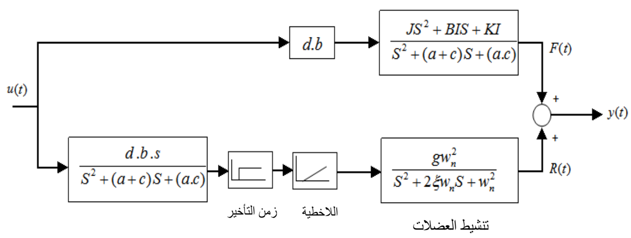
2. نموذج النظام

اجتذبت التغيرات الداخلية المتأصلة في الحركات البشرية اهتماما متزايدا في بحوث التحكم في المحركات والتحكم الحركي خلال العقود الأربعة الماضية ، و لوحظ أن ديناميكيات مسارات الزوايا المشتركة واستراتيجية تنشيط العضلات ترتبط ارتباطا وثيقا بالدور الوظيفي والقيود الميكانيكية للمفاصل. و في هذا البحث يمثل النموذج الرياضي لنظام ديناميكيات مفصل الكاحل في الشكل 1 التالي العلاقة بين زاوية مفصل الكاحل وعزم الكاحل كمجموع بين جزء خطي و جزء غير خطي حيث يكون دخل النظام u هو عبارة عن الموقع والخرج y يكون حاصل جمع عزم الدوران الجوهري F و العزم المنعكس (رد الفعل اللارادي) R.



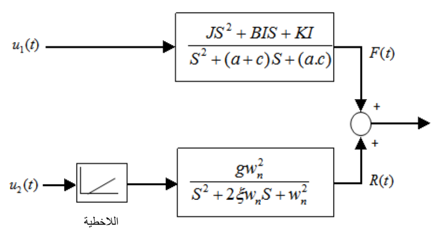
شكل 1. نموذج نظام ديناميكيات الكاحل البشري

حيث يمثل الجزء العلوي الخطي في النموذج الصلابة الجوهرية و التي تعتبر المكون الخاص لديناميكيات الكاحل و الذي تكون معاملاته هي (القصور الذاتي J واللزوجة BI والمرونة KI)، بينما الجزء السفلي الغير خطي يمثل الصلابة اللارادية و التي تتكون من مفاضل وزمن التأخير و اللاخطية الثابتة و كذالك التنشيط العضلي لديناميكيات الكاحل و الذي تكون معاملاته (معامل التكبير g والتردد الطبيعي w_n والتخميد ξ) [1]. وفي هذا البحث تم تحوير النموذج الرياضي في الشكل 1 السابق كالتالي وذالك لتجنب التفاضلات.



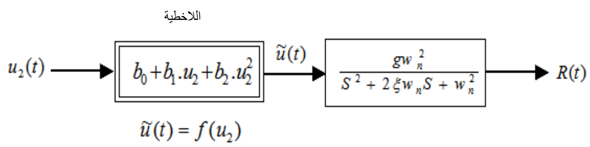
شكل 2 . نموذج نظام ديناميكيات الكاحل بعد التحوير

ومع افتراض أن زمن التأخير معلوم و اللاخطية معلومة تم اعتبار أن نموذج النظام بدخلين وخرج واحد كما هو موضح في الشكل 3 التالي،



شكل 3 . نموذج النظام بدخلين و خرج واحد

والجزء السفلي للنموذج في الشكل 3 السابق تم التعامل معه كنموذج هامرشتاين الموضح في الشكل 4 التالي،



شكل 4 . تمثيل نموذج هامرشتاين

ومن ثم تمثيل النموذج الرياضي لنظام ديناميكيات الكاحل بنموذج فضاء الحالة، ومنها يكون متجه دخل النظام U(t) و مصفوفة النظام A ومصفوفة الدخل B ومصفوفة الخرج C و كذالك مصفوفة العبور D للنموذج الموضح في الشكل 3 السابق كما يلي

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ U_2(t) \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$U_2(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ u_2(t) \\ u_2^2(t) \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -(a.c) & -(a+c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -w_n^2 & -2.\xi.w_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_0 & b_1 & b_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$C = [(KI - J(a.c)) \quad (BI - J(a+c)) \quad g.w_n^2 \quad 0] \tag{5}$$

$$D = [J \quad 0 \quad 0 \quad 0] \tag{6}$$

3 . مرشح كالمان لتقدير حالات و معاملات النظام

في هذا الجزء من البحث ستوضح الفقرة (أ) بايجاز قابلية المراقبة و تعريف النظام، و تحتوي الفقرة (ب) نبذة مختصرة عن مرشح كالمان الهجين و الية عمله، و الفقرة (ج) ستوضح مرشح كالمان الممدد و هيكليته العامة، أما الفقرة (د) ستوضح باختصار طريقة خطأ التنبؤ التكراري وهيكليتها العامة.

أ. قابلية المراقبة و تعريف النظام [2]

عادة ما يتم مراقبة حالات أي نظام ميكانيكي عندما تكون متغيرات الحالة الداخلية للنظام غير متاحة أو يكون القياس لمتغيرات الحالة عالي التكلفة. وقبل تصميم أي مراقب أو مرشح كالمان يجب أن يكون النظام قابل للمراقبة بالكامل، ولهذا نتطرق في هذا البحث لمعرفة قابلية المراقبة لنظام ديناميكيات الكاحل حسب معاييركالمان، وهو أن النظام يكون قابل للمراقبة عندما يكون محدد مصفوفة المراقبة لا يساوي صفر كالتالي،

$$\varphi\beta = det \begin{bmatrix} C \\ C.A \\ C.A^2 \\ \vdots \\ C.A^{n-1} \end{bmatrix} \neq 0 \tag{7}$$

بينما لتعريف معاملات أي نظام ميكانيكي يجب أن تكون معاملات نموذج النظام قابلة للتعريف و ذالك بأن تكون القيم المقدرة لمعاملات نموذج النظام تقترب من قيم معاملات النظام الأصلي و هذا يعني

$$\lim_{N\to\infty}\{\hat{\theta}\ (N)\} = \theta_0 \qquad (8)$$

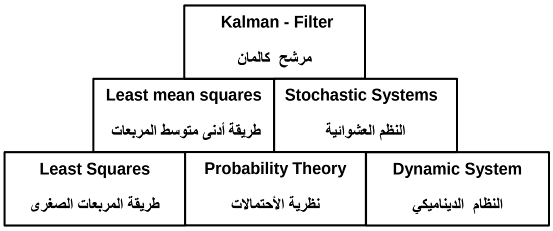
$$\lim_{N\to\infty} = cov[\Delta\theta] = 0 \qquad (9)$$

$$\Delta\theta = \left(\theta_0 - \hat{\theta}\right) \qquad (10)$$

حيث θ_0 تمثل قيم معاملات النظام الاصلي و $\hat{\theta}\ (N)$ القيم المقدرة لمعاملات نموذج النظام و N تمثل عدد مرات القياس للخرج و cov هو رمز لعملية التغاير. و في هذا البحث تم اختبار قابلية المراقبة و قابلية التعريف لنظام ديناميكيات الكاحل و تم التأكد من أن النظام قابل للمراقبة و كذالك قابل للتعريف.

ب. مرشـــح كالمـــان الهجين (Hybrid Kalman Filter)

مرشح كالمان هو مجموعة من المعادلات الرياضية التي توفر بكفاءة حسابات لتقدير حالات النظم المتأثر بضوضاء القياس البيضاء الجاوسية (Gaussian Noise) بطريقة يقل فيها مربع خطأ التقدير الى الحد الأدنى، وعادة ما يستخدم مرشح كالمان لمراقبة الأنظمة التي تلازمها اضطرابات عشوائية (Stochastic Disturbance)، و المخطط الهرمي في الشكل 5 التالي يوضح المفاهيم الأساسية التي يبنى عليها مرشح كالمان بوجه عام .



الشكل 5 . المخطط الهرمي للمفاهيم التي يبنى عليها مرشح كالمان

في هذا البحث تم استخدام مرشح كالمان الهجين في كلتا طريقتي التعريف المستخدمة والذي يكون موضح بالتفصيل في [3]، [4]، حيث أن مرشح كالمان الهجين يستخدم عندما تكون ديناميكيات النظام و كذالك ضوضاء النظام في الزمن المستمر، بينما القياس و كذالك تشويش القياس تكون في الزمن المتقطع كالتالي

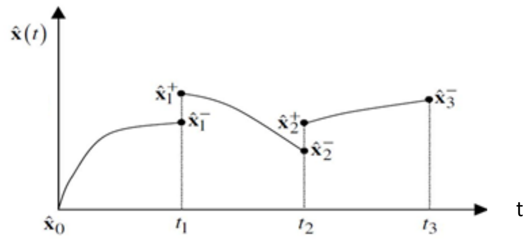
$$\frac{d}{dt}x(t) = A.x(t) + B.u(t) + n(t) \qquad (11)$$

$$y_k = C_k.x(t_k) + D_k.u(t_k) + v_k \qquad (12)$$

بحيث

$$\boldsymbol{n(t)} \approx (\boldsymbol{0}\,,\boldsymbol{Q}) \qquad\qquad \boldsymbol{v_k} \approx (\boldsymbol{0}\,,\boldsymbol{R_k}\,)$$

وتمثل $\boldsymbol{n(t)}$ ضوضاء النظام و $\boldsymbol{v_k}$ ضوضاء القياس و Q مصفوفة التغاير لضوضاء النظام بينما $\boldsymbol{R_k}$ تمثل مصفوفة التغاير لتشويش القياس. والية عمل مرشح كالمان الهجين في الشكل 6 التالي توضح أن عملية تقدير حالات النظام تكون في الزمن المستمر والقياس يكون في الزمن المتقطع، حيث أن عند كل نقطة قياس (.... , $\boldsymbol{t_1}\ ,\boldsymbol{t_2}\ ,\ \boldsymbol{t_3}$) تكون هناك عملية تحديث لقيم الحالات المقدرة والتي تكون نقطة البداية لتقدير الحالات التي تليها حيث أن (.... , $\hat{\boldsymbol{x}}_1^-, \hat{\boldsymbol{x}}_2^-, \hat{\boldsymbol{x}}_3^-$) تمثل الحالات المقدرة عند نقاط القياس قبل التحديث و (... , $\hat{\boldsymbol{x}}_1^+\ ,\ \hat{\boldsymbol{x}}_2^+\ ,\ \hat{\boldsymbol{x}}_3^+$) تمثل قيم الحالات المقدرة عند نقاط القياس بعد التحديث.



شكل 6 . الية عمل مرشح كالمان الهجين

ج . مـرشـح كـالـمـان الممـدد (Extended Kalman Filter)

مرشـح كالمـان يـتم تمديـده لتقـديرمعاملات ديناميكيـات النظـام، حيـث أن مرشح كالمان الخطي يتحول بعد التمديد الى مراقب غير خطي و مع هذا فان مرشح كالمان الممدد ينفذ معادلات مرشـح كالمـان القياسية لديناميكيات النظام الناتجة من تحويل ديناميكيات المراقب الغير الخطية الى خطية عند نقاط تشغيل الحالات و المعاملات المراد مراقبتها و الذي يكون موضح بالتفصيل في [5]، [6]، [7]. وعندما تكون معادلات النظام كالتالي

$$\dot{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\theta}).\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{\theta}).\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{n}(\boldsymbol{t}) \qquad (13)$$

$$\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t_k}) = \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\theta}).\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t_k}) + \boldsymbol{v}(\boldsymbol{t_k}) \qquad (14)$$

و $\boldsymbol{x(t)}$ يمثل متجه حالات النظام و $\boldsymbol{\theta(t)}$ يمثل متجه معاملات النظام، فأنه يتم تمديد متجه حالات النظام الى معاملاته كما هو موضح في المعادلة التالية

$$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{t}) = \begin{bmatrix}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t})\\ \boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{t})\end{bmatrix} \qquad (15)$$

ومنها يصبح المراقب بعد التمديد غير خطي وتكون معادلاته كما يلي

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t})\\ \dot{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{t})\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t}),\hat{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{t}),\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}))\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\boldsymbol{n}(\boldsymbol{t})\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix} \qquad (16)$$

$$\boldsymbol{y_k} = \boldsymbol{h}\big(\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t_k})\big) + \boldsymbol{v_k} \qquad (17)$$

حيث $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{t})$ في المعادلة (16) السابقة تمثل القيمة المقدرة لمعاملات النظام. وعند تمديد حالات نظام ديناميكيات الكاحل البشري المبينة في المعادلة (18) التالية الى معاملاته المبينة في المعادلة (19) التالية، يتكون نظام غير خطي كما هو موضح في المعادلات (20) و (22) التاليه

$$\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t}) = \begin{bmatrix}\boldsymbol{x_1}(\boldsymbol{t})\\ \boldsymbol{x_2}(\boldsymbol{t})\\ \boldsymbol{x_3}(\boldsymbol{t})\\ \boldsymbol{x_4}(\boldsymbol{t})\end{bmatrix} \qquad (18)$$

$$\theta(t)=\begin{bmatrix}\theta_1(t)\\ \theta_2(t)\\ \theta_3(t)\\ \theta_4(t)\\ \theta_5(t)\\ \theta_6(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}KI\\ J\\ BI\\ W_n^2\\ 2\xi W_n\\ gW_n^2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_5(t)\\ x_6(t)\\ x_7(t)\\ x_8(t)\\ x_9(t)\\ x_{10}(t)\end{bmatrix} \quad (19)$$

$$f(X(t),U(t))=\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_4\\ \dot{x}_5\\ \dot{x}_6\\ \dot{x}_7\\ \dot{x}_8\\ \dot{x}_9\\ \dot{x}_{10}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_2\\ -s_1x_1-s_2x_2+u_1\\ x_4\\ -x_8x_3-x_9x_4+x_{10}u_2\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \quad (20)$$

ولأن خرج النظام يكون كالتالي

$$y(t_k)=F(t_k)+R(t_k) \quad (21)$$

فأنه بعد التمديد يكون

$$y_k=(x_5-x_6s_1)x_1+(BI-Js_2)x_2+x_{10}x_3+x_6u_1 \quad (22)$$

ويتم حساب قيمة مكبر كالمان K بحيث يتم تحويل النظام من غير خطي الى خطي حول نقاط تشغيل الحالات و المعاملات المراد مراقبتها، و منها تتكون مصفوفة النظام F و مصفوفة الخرج H ومصفوفة التغاير لضوضاء النظام L و كذالك مصفوفة التغاير لتشويش القياس M و كل هذه المصفوفات تكون خطية و متغيرة مع الزمن و التي تمثل مصفوفات يعقوبي التالية

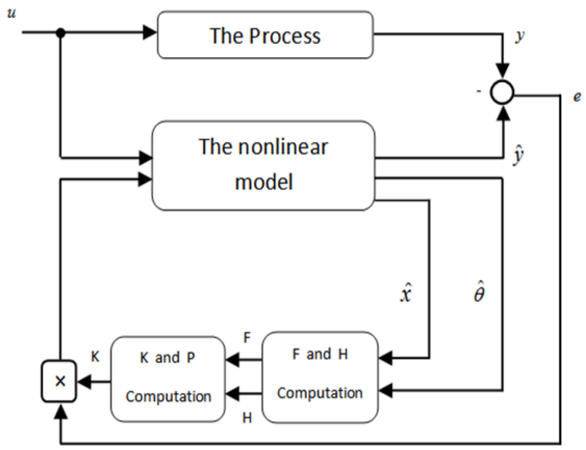
$$H=\frac{\partial h}{\partial X^T}\Big|_{\hat{x}} \quad (23)$$

$$M=\frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{\hat{x}} \quad (24)$$

$$F=\frac{\partial f}{\partial X^T}\Big|_{\hat{x}} \quad (25)$$

$$L=\frac{\partial f}{\partial n}\Big|_{\hat{x}} \quad (26)$$

و يوضح شكل 7 التالي الهيكلية العامة لالية عمل مرشح كالمان الممدد حيث أن y تمثل خرج النظام و $\hat{y}$ خرج المراقب و e تمثل خطأ التقدير بينما $\hat{x}$ تمثل القيمة المقدرة لحالات النظام و $\hat{\theta}$ تمثل القيمة المقدرة لمعاملات النظام.



شكل 7 . الهيكلية العامة لمرشح كالمان الممدد

د. طريقة خطأ التنبؤ التكراري (Recursive Prediction Error)

في هذه الطريقة يتم الحصول على القيم المثالية لمعاملات المراقب بحيث يصبح مجموع مربع خطأ التقدير بين خرجي نموذج النظام $y(t_k)$ و المراقب $\hat{y}(t_k,\theta)$ أقل ما يمكن، أي أن قيمة معامل الجودة $J(\theta)$ تصل الى أقل ما يمكن كما يلي،

$$J(\theta)=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}e_{pe}^2(t,\theta) \quad (27)$$

بحيث

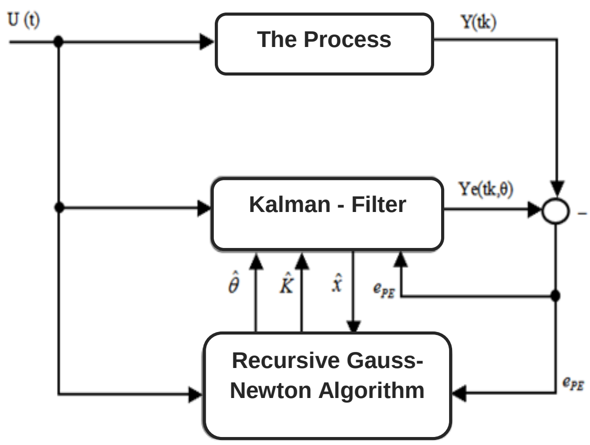
$$J(\theta)\rightarrow min \quad (28)$$

$$E\{e_{pe}^T(\theta)e_{pe}(\theta)\}=0 \quad (29)$$

حيث يكون حساب خطأ التقدير كالتالي

$$e_{pe}(t,\theta)=y(t_k)-\hat{y}(t_k,\theta) \quad (30)$$

ويتم تقدير حالات النظام من قبل المراقب (مرشح كالمان الهجين) بينما معاملات النظام يتم تقديرها باستخدام احدى خوارزميات التحسين المثالية، وفي هذا البحث تم استخدام خوارزمية جاوس- نيوتن التكرارية، حيث مكبر كالمان K يقدر كقيمة ثابتة بواسطة خوارزمية جاوس- نيوتن و من ثم ترسل قيمته مع القيم المقدرة للمعاملات في كل لحظة قياس الى المرشح وتستمر هذه العملية حتى وصول مجموع مربع خطأ التقدير الى الحد الادنى، والشكل 8 التالي يوضح الهيكلية لهذه الطريقة والتي تكون موضحة بالتفصيل في [8] [9].



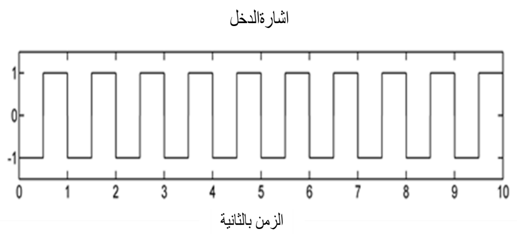
شكل 8 . الهيكلية العامة لطريقة خطأ التنبؤ التكراري

4 . التجارب الإختبارية وتحليل النتائج

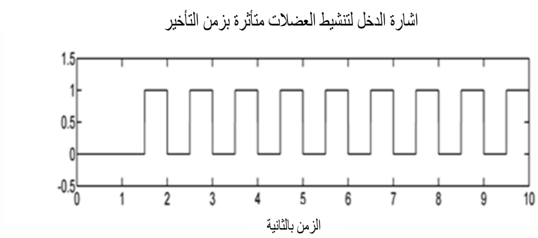
في هذا البحث تم تطبيق طريقتي التعريف التاليتين باستخدام برنامج (MATLAB SIMULINK) و ذلك لتقدير الحالات والمعاملات الفيزيائية لنظام ديناميكيات الكاحل البشري، الطريقة الأولى هي مرشح كالمان الممدد (Extended Kalman Filter)، أما الطريقة الثانية فهي طريقة خطأ التنبؤ التكراري (Recursive Prediction Error) باستخدام مرشح كالمان الهجين كمراقب لحالات النظام و باستخدام خوارزمية التحسين المثالية (جاوس- نيوتن).

أ. نتائج تطبيق مرشح كالمان الهجين الممدد على نظام ديناميكيات الكاحل

عند تطبيق مرشح كالمان الممدد على نظام ديناميكيات الكاحل تم استخدام اشارة الدخل الموضحة في الشكل 9 لزاوية الكاحل أما اشارة الدخل لتنشيط العضلات هي نفس اشارة الدخل لزاوية الكاحل و لاكن تكون متأثرة بزمن التأخير المعلوم كما في الشكل 10 و من تم بالللاخطية المعلومة مسبقا.

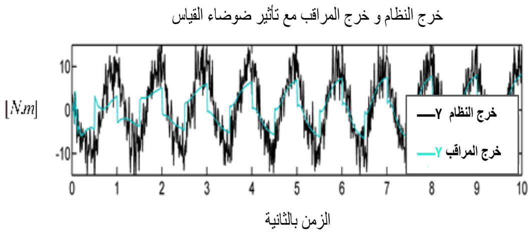


الشكل . 9 اشارة الدخل لزاوية الكاحل

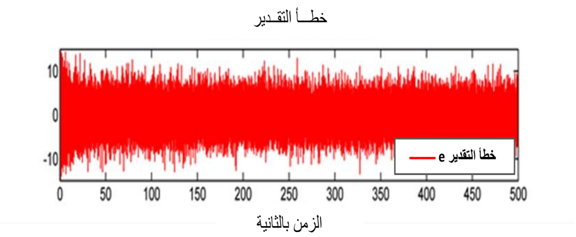


الشكل 10 . اشارة الدخل متأثرة بزمن التأخير

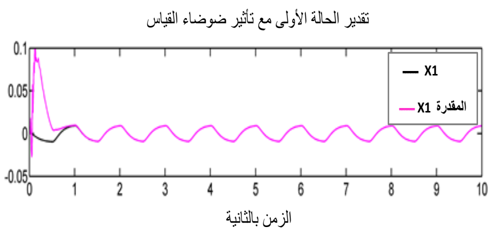
من الواضح في الشكل 11 التالي أن خرج المراقب يحاول تتبع خرج نموذج النظام وفي الشكل 12 أن خطا التتقدير كبير نوعا ما، ومن الشكل 13 و الشكل 14 التاليين نلاحظ ان الحالة الأولى و كذالك الحالة الثانية لنظام ديناميكيات الكاحل تم تقديرها بالشكل الأمثل خلال الثانية الأولى للتشغيل، ومن الشكل 15 و الشكل 16 نلاحظ أن حالات النظام الثالثة و الرابعة تم تقديرها بشكل قريب جدا من قيمها الحقيقية، حيث تم ذالك خلال جزء بسيط من الثانية الأولى للتشغيل.



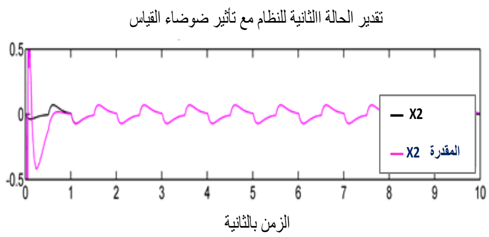
شكل 11 . يوضح خرج النظام و خرج المراقب مع تأثير ضوضاء القياس



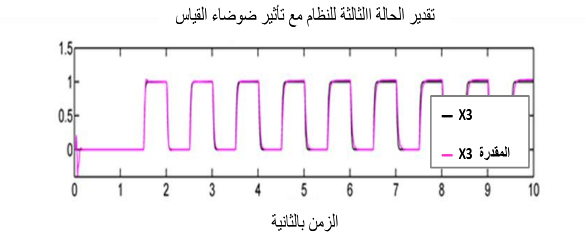
شكل 12. يوضح خطأ التقدير مع تأثير ضوضاء القياس



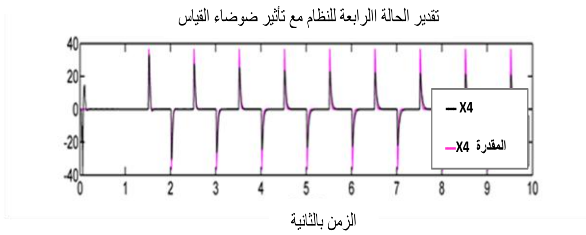
شكل 13 . يوضح تقدير الحالة الأولى للنظام مع تأثير ضوضاء القياس



شكل 14 . يوضح تقدير الحالة الثانية للنظام مع تأثير ضوضاء القياس

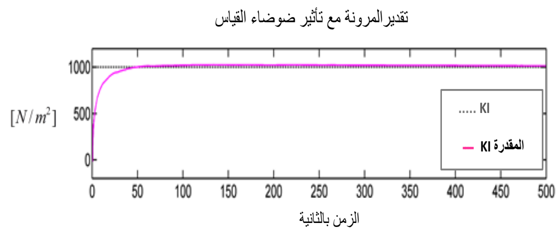


شكل 15 . يوضح تقدير الحالة الثالثة للنظام مع تأثير ضوضاء القياس

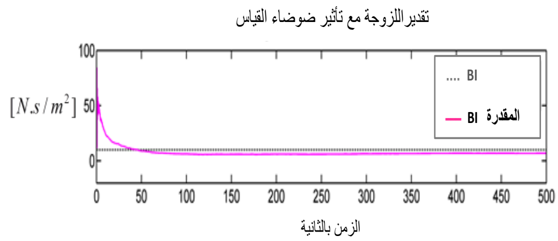


شكل 16 . يوضح تقدير الحالة الرابعة للنظام مع تأثير ضوضاء القياس

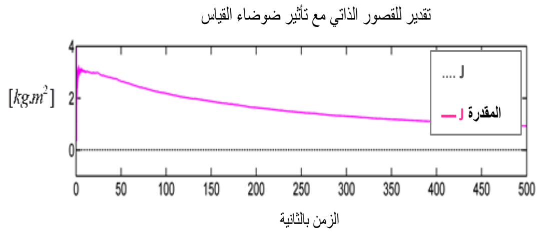
والشكل 17 التالي يوضح أن القيمة المقدرة للمرونة تقترب الى قيمة قريبة جدا من قيمتها الحقيقية خلال 50 ثانية الأولى من التشغيل، أما القيمة المقدرة للزوجة تقترب نوعا ما من قيمتها الحقيقية خلال 40 ثانية الأولى للتشغيل كما هو واضح في الشكل 18، بينما القيم المقدرة للقصور الذاتي و للزمن الطبيعي و التخميد و كذالك التكبير تبتعد عن قيمها الحقيقة في نموذج النظام الأصلي كما هو واضح في الشكل 19 والشكل 20 و الشكل 21 و الشكل 22 التالية.



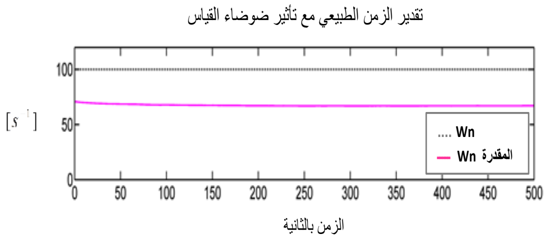
الشكل 17 . يوضح تقديرالمرونة مع تأثير ضوضاء القياس



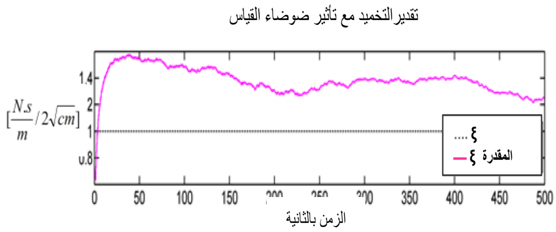
الشكل 18 . يوضح تقدير اللزوجة مع تأثير ضوضاء القياس



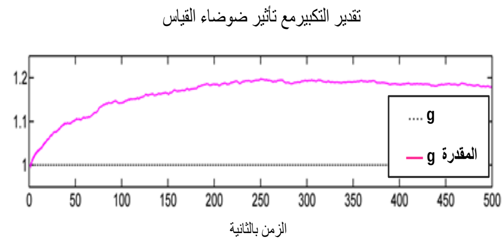
الشكل 19 . يوضح تقدير القصورالذاتي مع تأثير ضوضاء القياس



الشكل 20 . يوضح تقديرالزمن الطبيعي مع تأثير ضوضاء القياس



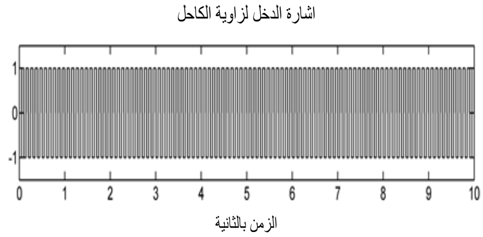
الشكل 21 . يوضح التخميد مع تأثير ضوضاء القياس



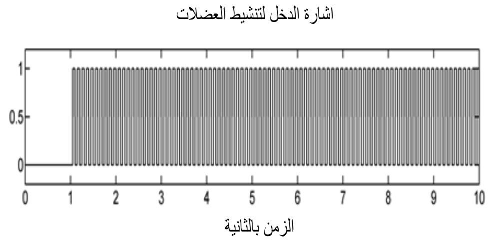
الشكل 22 . يوضح تقديرالتكبيرمع تأثير ضوضاء القياس

ب. نتائج تطبيق طريقة خطأ التنبؤ التكراري على نظام ديناميكيات الكاحل

عند تطبيق هذه الطريقة على نظام ديناميكيات الكاحل تم استخدام اشارة الدخل الموضحة في الشكل 23 لزاوية الكاحل أما اشارة الدخل لتنشيط العضلات هي نفس اشارة الدخل لزاوية الكاحل ولاكن تكون متأثره بزمن التأخير المعلوم كما في الشكل 24 و من تم باللاخطية المعلومة مسبقا.

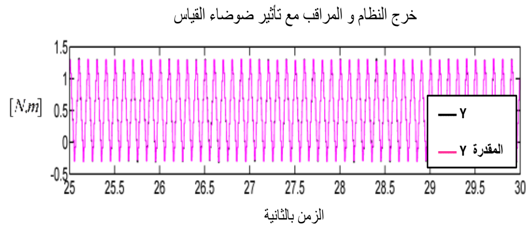


الشكل 23 . يوضح اشارة الدخل لزاوية الكاحل

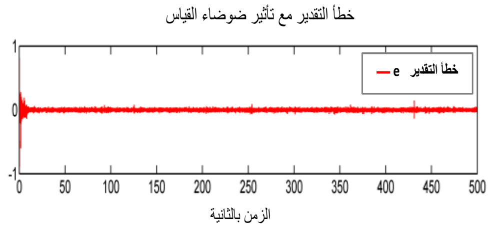


الشكل 24 .يوضح اشارة الدخل لتنشيط العضلات

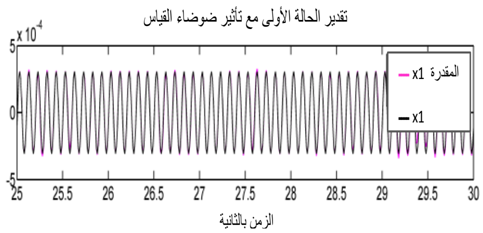
من الواضح في شكل 25 التالي أن خرج المراقب يطابق خرج نموذج النظام وفي الشكل 26 أن خطا التقدير قريب جدا من الصفر و منها نتوقع أن عملية مراقبة حالات النظام و كذالك تعريف معاملات النظام تمت بالشكل الامثل، ومن الشكل 27 و 28 و 29 و 30 نلاحظ أن جميع حالات نظام ديناميكات الكاحل تم تقديرها بالشكل الأمثل منذ بداية التشغيل.



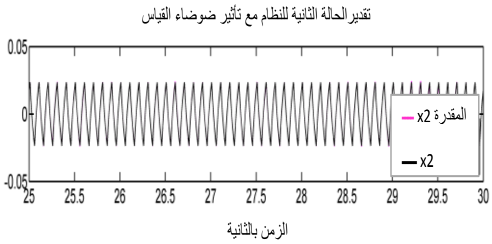
الشكل 25 . يوضح خرج النظام والمراقب مع تأثير الضوضاء



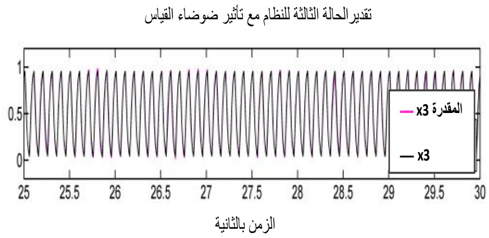
الشكل 26 . يوضح خطأ التقدير مع تأثير الضوضاء



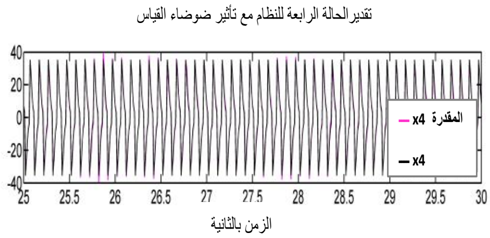
الشكل 27. يوضح الحالة الأولى مع تأثير الضوضاء



الشكل 28 . يوضح الحالة الثانية مع تأثير الضوضاء

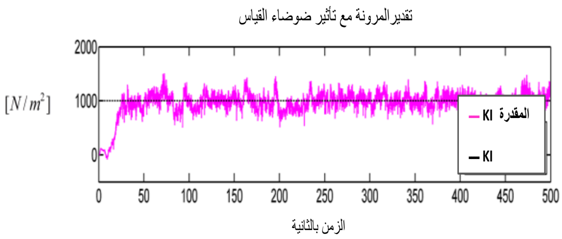


الشكل 29 . يوضح الحالة الثالثة مع تأثير الضوضاء

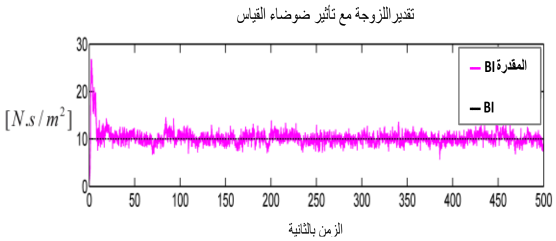


الشكل 30 . يوضح الحالة الرابعة مع تأثير الضوضاء

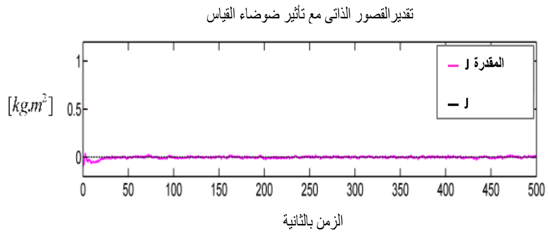
ومن الأشكال 31 الى 36 التاليه يتضح أن القيمة المقدرة للمرونة و اللزوجة و للقصور الذاتي والتردد الطبيعي و كذالك القيم المقدرة للتخميد و التكبير وصلت لقيمتها الحقيقية في زمن أقل من خمسين ثانية منذ بداية التشغيل.



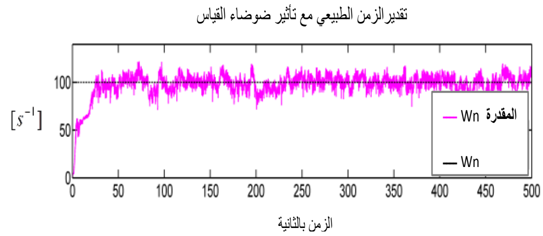
الشكل 31 . يوضح تقديرالمرونة مع تأثير ضوضاء القياس



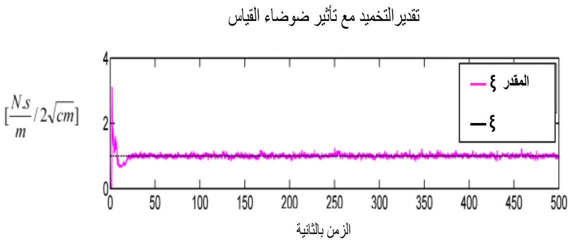
الشكل 32 . يوضح تقديراللزوجة مع تأثير ضوضاء القياس



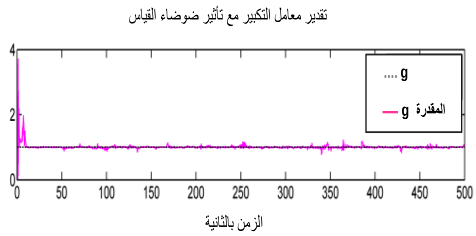
الشكل 33 . يوضح تقدير القصور الذاتي مع تأثير ضوضاء القياس



الشكل 34 . يوضح تقدير الزمن الطبيعي مع تأثير ضوضاء القياس



الشكل 35 . يوضح تقدير التخميد مع تأثير ضوضاء القياس



الشكل 36 . يوضح تقديرمعامل التكبير مع تأثير ضوضاء القياس

5 . الأستنتاج

من التجارب الأختبارية لمرشح كالمان الممدد على النموذج الرياضي لنظام ديناميكيات الكاحل البشري نستطيع استنتاج أن مرشح كالمان يعتبرمراقب جيد لحالات النظام المتأثر بضوضاء القياس، و نلاحظ أنه ليس هناك ضمان لحل مشكلة التقدير المثالي لقيم معاملات النظام، حيث أنه من المتوقع أن هذا له علاقة رئيسية بهيكلية النموذج الرياضي للنظام الأصلي. و من التجارب الأختبارية لطريقة خطأ التنبؤ التكراري باستخدام مرشح كالمان الهجين كمراقب و خوارزميات التحسين المثالية (جاوس- نيوتن التكرارية) نستطيع استنتاج أن هذه الطريقة تعمل بشكل جيد عند استخدام خوارزميات (جاوس- نيوتن) مع معامل النسيان (*Forgetting- Factor = 0.95*) حيث تصل جميع الحالات وكذالك المعاملات الفيزيائية للنظام الى القيم المثالية خلال 25 ثانية مند بداية التشغيل و نلاحظ كما في [10] أنه يجب أن تكون الضوضاء صغيرة بالنسبة للأشارة المقاسة لتصل الخوارزميات لنتائج مضمونة، و من هذا نستنتج أن الطريقة تعمل بشكل جيد و وصلت لحل مشكلة التقدير المثالي لحالات و كذالك المعاملات الفيزيائية لنظام ديناميكيات الكاحل البشري.

6 . المراجع

[1] Kukreja S, Galiana H and Kearney R (2003): NARMAX Representation and Identification of Ankle Dynamics. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 50, NO. 1, January, S. 70 - 81.

[2] Isermann R (1992): (Identifikation dynamischer Systeme 1 (Grundlegende Methoden)). 2. Auflage, Verlag Berlin /Heidelberg: Springer. S. 289-190, 220, 236.

[3] Simon D (2006): (optimal State Estimation) (Kalman, and nonlinear Approaches). Copyright by John Wiley & Sons, Inc, S.403 - 405.

[4] Crassidis J and Junkins J (2004): (Optimal estimation of dynamic Systems). CRC Press LLC, S. 283-285.

[5] Ljung L (1979): Asymptotic behavior of extended Kalman filter as a paramter estimator for linear systems, IEEE, Vol. AC-24, No. 1 S. 36-50.

[6] Grewal M, Andrews A (2001): (Kalman Filtering (Theory and Practice using Matlab)). Second Edition, Copyright by John Wiley & Sons, Inc.Robert F.

[7] Stengel R (1994): (Optimal control and estimation). Dover publications, INC. New York. Copyright. S. 393.

[8] Moore J and Weiss H (1979): Recursive Prediction Error Methods for Adaptive Estimation. IEEE, vol. SMC-9, No. 4, S. 197 - 205.C.

[9] Bohn C (2000): Recursive Parameter Estimation for Nonlinear Continuous Time Systems through Sensitivity-Model Based Adaptive Filters. Dissertation, Pro BUSINESS GmbH.

[10] Gavel D and Azevedo S (1982): Identification of continuous time Systems - An Application of Ljung's - Corrected extended Kalman Filter. IFAC Identification and System Parameter Estimation , Washington D.C. ,USA, S. 1329 -1333.extended Kalman Filter. IFAC Identification and System Parameter Estimation , Washington D.C. ,USA (1982) , S. 1329 -1333.

[11] Coronado E, González A, Cárdenas A, Maya M, Chiovetto E and Piovesan D (2021): Self-Tuning Extended Kalman Filter Parameters to Identify Ankle's Third-Order Mechanics. Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 143, Issue 3, March.

[12] Coronado L, Romero R, Maya M, Cardenas A and Piovesan D (2016): Combining Genetic Algorithms and Extended Kalman Filter to Estimate Ankle's Muscle-Tendon Parameters. Dynamic System and Control Conference, Volume Subject Area: Bio Engineering Applications, January.

[13] Fakoorian S, Azimi V, Moosavi M, Richter H and Simon D (2017): Ground Reaction Force Estimation in Prosthetic Legs with Nonlinear Kalman Filtering Methods. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 139, Issue 11, November.