

# Çoklu Sensör İz Füzyonu Performans Ölçütleri

## Multi Sensor Track Fusion Performance Metrics

Evrin Anıl Evirgen  
Komuta Kontrol ve Savaş Sistemleri GMY'lığı  
HAVELSAN  
Ankara, Türkiye  
eevirgen@havelsan.com.tr

**Özetçe**—İz füzyonu, komuta kontrol sistemlerinin sahip olması gereken önemli özelliklerden biridir. Farklı sensörlerden gelen iz bilgileri bu sayede birleştirilerek daha doğru bir sonuç elde edilebilir. İz füzyonu yöntemleri geliştirilirken performansın değerlendirilmesi ve karşılaştırılabilmesi için kriterler ve ölçütlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma önemli bazı iz füzyonu ölçütlerini özetlemektedir.

**Anahtar Kelimeler** — iz füzyonu, performans ölçütü

**Abstract**—Track fusion is one of the primary features in command and control systems. Track information of different sensors are combined to have a more accurate result. Criteria and metrics are required to evaluate and compare different fusion methods during development. This paper summarizes some important track fusion metrics.

**Keywords** — track fusion, performance metric

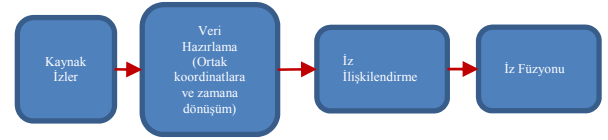
### I. GİRİŞ

Modern komuta kontrol sistemleri farklı sensörlerden gelen verileri birleştirerek daha yüksek doğrulukla sonuçlar üretmek üzere iz füzyonu yapacak şekilde geliştirilmektedir. İz füzyonu yöntemlerinin seçimi ve geliştirilmesinde en önemli aşamalardan biri doğru kriterlerin ve ölçütlerin belirlenerek performans analizi yapılmasıdır.

Bu performans ölçütleri sistemin geliştirme sürecinde yapılacak simülasyonlarda kullanılabileceği gibi sistemin işleme alınmasından sonraki aşamalarda da kullanılabilir.

Simülasyonlar sırasında oluşturulacak hedeflerin parametreleri (pozisyon, hız, ivme gibi) bilineceğinden füzyon sonuçları ile karşılaştırılacak kesin referans (ground truth) olarak kullanılabilecektir. İşletilen sistemde ise hedeflerin gerçek yerleri bilinmediğinden farklı analiz yöntemleri geliştirilmesi gerekmektedir.

### II. İZ FÜZYONU PROBLEMİ



Şekil 1. İz füzyonu aşamaları

Füzyon algoritması uygulanmadan önce ortak koordinatlara dönüşümlerinin yapılmış olması ve füzyon yapılacak izlerin aynı referansa ait olduğunun belirlenmiş olması gerekir. İz ilişkilendirme için Hungarian, Auction, JVC gibi çeşitli atama algoritmaları uygulanmaktadır [1]. Bu işlemler sonrasında ise izler füzyona tabi tutulmaktadır.

İki sensörün,  $i = 1, 2$ , ortak bir hedefi  $t_{ik}$  anında  $y_{ik} = H_{ik}x(t_{ik}) + \eta_{ik}$  şeklinde gözlemlendiği durumu ele alalım. Her bir ölçüm hatası kovaryansı  $R_{ik}$  olan bağımsız sıfır ortalamalı Gauss rastlantısal vektör  $\eta_{ik}$  ile ifade edilmektedir. [2]

Hedef durumu  $x(t)$  bir sürekli-zaman vektör stokastik süreçtir ve lineer stokastik diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir:

$$dx(t) = A_t x(t)dt + B_t dw(t)$$

İlk zamandaki,  $t_0$ , ilk koşul vektörü  $x(t_0) = x_0$ ,  $\bar{x}_0$  ortalama ve  $\bar{V}_0$  kovaryans matrisi ile tanımlanmaktadır.  $w(t)$  ise bir Wiener sürecidir.  $x_0$ ,  $(w(t))_{t \in [t_0, \infty)}$  ve  $((\eta_{ik})_{k=1}^{N_i})_{i=1}^2$  birbirinden bağımsız varsayılmaktadır. ( $N_i$  zamansal eksenindeki gözlem sayısıdır.)

Her bir yerel sensör,  $i = 1, 2$ , ölçümleri,  $y_{ik}$ , bir Kalman filtresi kullanarak işleyerek hedef durum kestirimini idame ettirmekte ve füzyon zamanında,  $t_F$ , birbirlerine ya da üst seviye füzyon merkezine yerel durum kestirimini,  $\hat{x}_i = E(x(t_F) | (y_{ik})_{k=1}^{N_i})$ , ve kestirim hatası kovaryans matrisini  $V_i$  iletmekte olduğu varsayılmaktadır.

Füzyon yapılmış hedef durumu  $\hat{x}_F$  iki yerel kestirim  $\hat{x}_1$  ve  $\hat{x}_2$  birleştirilerek oluşturulur.

$x = x(t_F)$ ,  $\bar{x} = \mathbb{E}(x(t_F))$ ,  $\bar{V} = \mathbb{E}((\bar{x} - x)(\bar{x} - x)^T)$  şeklinde ifade edilmektedir.  $\hat{x}_i$  ve  $\tilde{x}_i = \hat{x}_i - x$  ise sırasıyla yerel kestirim ve kestirim hatası göstermektedir. Birçok füzyon yöntemi için yerel Kalman filtrelerinden elde edilen yerel kestirim kovaryans matrisi  $V_i = \mathbb{E}(\tilde{x}_i \tilde{x}_i^T)$  dışında çapraz kovaryans matrislerine,  $V_{12} = \mathbb{E}(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2^T)$  ve  $V_{0i} = \mathbb{E}((\bar{x} - x) \tilde{x}_i^T)$ , ihtiyaç duyulması,

- $\tilde{x}_1$  ve  $\tilde{x}_2$  yerel kestirim hatalarının birbirleriyle ortak ilk koşul  $x_0$  ve ortak hedef dinamik süreç gürültüsü  $(w(t))_{t \in [t_0, \infty)}$  ile dolayısıyla ilişkili oldukları,
- yerel kestirim hatalarının,  $\tilde{x}_i$ , hedef durumundan,  $x$ , bağımsız olmadığı olgularını belirtmektedir.

Temel bir füzyon probleminde füzyon yapılmış durum kestirimi,  $\hat{x}_F$ , iki yerel kestirimin,  $\hat{x}_1$  ile  $\hat{x}_2$  ve geçmişten gelen  $x$  bilgisine dayanılarak oluşturulan güncel  $\bar{x}$  tahmininin birleştirilmesiyle oluşturulur.

$$\hat{x}_F = W_0 \bar{x} + W_1 \hat{x}_1 + W_2 \hat{x}_2$$

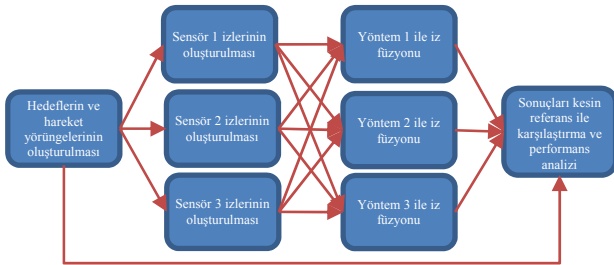
$W_0 + W_1 + W_2 = I$  (yanlılık (bias) olmaması koşulu)

İz füzyonu yöntemlerinin büyük çoğunluğu bu formda olduğundan kestirim hata kovaryansı açısından performans analitik olarak aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$V_F = \mathbb{E}((\hat{x}_F - x)(\hat{x}_F - x)^T) \\ = [W_0 \quad W_1 \quad W_2] \begin{bmatrix} \bar{V} & V_{01} & V_{02} \\ V_{01}^T & V_1 & V_{12} \\ V_{02}^T & V_{12}^T & V_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_0^T \\ W_1^T \\ W_2^T \end{bmatrix}$$

*Bar-Shalom-Campo*, *Speyer*, *Tracklet*, *Minimum Variance*, *Maximum Likelihood* ve *Covariance Intersection* yöntemleri  $W_i$  hesaplanırken çapraz kovaryansların bilinmesi ya da bilinmemesine göre farklılıklar göstermektedirler. Çapraz kovaryansların hesaplanması ise yerel filtrelerin Kalman kazançlarının bilinmesine ihtiyaç duyduğundan sensörlerin bu bilgiyi sağlamadığı sistemlerde gerçekleştirilemeyecek bir işlemdir. [3]

### III. KESİN REFERANS HEDEFLERİN MEVCUT OLDUĞU DURUMDA KULLANILAN METRİKLER



Şekil 1. Simülasyon düzeneği

Sensör iz füzyonu performansı öncesinde yer alan ölçüm alınması, hedef izleme yöntemleri, ortak koordinata/zamana dönüştürme yöntemleri ve iz ataması

yöntemlerinden etkilenmektedir. Dolayısıyla yapılacak simülasyon tüm sistemin toplam performansına dair sonuçlar üretecektir.

Sensörler içinde yer alan izleyicilerin performanslarını ölçmek için kullanılan ölçütler füzyon sonuçları için de kullanılabilir. Böylece yapılacak kıyaslama ile füzyondan elde edilen kazancın saptanması da mümkün olabilecektir.

Simülasyonlar gibi referans hedeflerin bilgilerinin mevcut olduğu durumda ölçütlerin hesaplanması için her bir  $k$  zaman adımına karşılık birleşik atama matrisi oluşturulur. [4, 5]

$$\bar{C}_{ln}(k) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } l \text{ referansı } n \text{ izine atanmış ise} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Aşağıdaki koşullar uygulandığı takdirde  $\bar{C}$  matrisi  $C$  olarak adlandırılır:

$$0 \leq \sum_{l=1}^{L(k)} \bar{C}_{ln}(k) \leq 1, \quad 0 \leq \sum_{n=1}^{N(k)} \bar{C}_{ln}(k) \leq 1$$

#### A. İz Sayısı Ölçütleri

- Geçerli İz Sayısı (Number of Valid Tracks):** Bir iz yalnız bir referans hedef (ground truth) ile ilişkilendirilmiş, ilişkilendirildiği referans hedef de yalnız tek bir izle ilişkilendirilmişse bu iz geçerli bir izdir. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:  $\sum_{l=1}^{L(k)} C_{ln}(k) = 1$
- Kaçırılan İz Sayısı (Number of Missed Targets):** Eğer bir referans hedef bir iz ile ilişkilendirilememişse kaçırılmış olarak belirlenir. Bu değer aşağıdaki durumun geçerli olduğu her bir hedef ve her bir zaman adımı için arttırılır:  $\sum_{n=1}^{N(k)} C_{ln}(k) = 0$
- Yanlış İz Sayısı (Number of False Tracks):** Bir iz eğer herhangi bir referans hedef ize atanmamış ise yanlış iz olarak belirlenir. Anlık yanlış hedef sayısını gösteren  $N_{false}^m(k)$  değeri  $m$ 'inci Monte Carlo koşumu ve  $k$ 'inci zaman adımı için aşağıdaki koşul sağlanıyorsa arttırılır:  $\sum_{l=1}^{L(k)} C_{ln}(k) = 0$
- Sahte İz Sayısı (Number of Spurious Tracks):** Bir iz birden fazla referans hedefe atanmış ise sahte hedef olarak belirlenir.  $\sum_{l=1}^{L(k)} \bar{C}_{ln}(k) > 1$
- Tamlık Ölçütü (Measure of Completeness):** Doğrulanmış izlerin sayısının referans hedeflerin sayısına oranı olarak tanımlanmıştır:

$$Comp(k) = \frac{N_{val}(k)}{L(k)}$$

Bu değer ne kadar bire yakınsa sistem performansının o kadar iyi olduğu anlaşılmaktadır.

- İzlerdeki Ortalama Değiş Tokuş (Average Number of Swaps in Tracks): Hedeflerin birbirlerine yaklaştığı durumlarda bir referans hedefin zaman içinde farklı izlere atanması oranını gösteren ölçüttür.
- Ortalama Kırılan İz Sayısı (Average Number of Broken Tracks): Belirli zaman dilimlerinde hiç bir iz bir referans hedefe atanamayabilir. Bu durum tüm referans hedefler için tüm Monte Carlo koşullarında hesaplanıp ortalama kırılan iz Sayısı bulunabilir.
- İz Sürekliliği (Track Continuity): Referans hedef  $l$  için iz sürekliliği ölçütü aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Tc_l^l = \frac{1}{N_l^t} \sum_{n=1}^{N_l^t} \frac{\Delta k_l^n}{\Delta k_l}$$

Burada  $N_l^t$  referans hedefe atanmış toplam iz sayısını gösterir. Bu ölçüt izlerdeki kırılma ve değiş tokuşları da göstermektedir ve %100'e yakın olması daha iyi bir performans anlamına gelmektedir.

- İz Artıklılığı (Tracks Redundancy): Geçerli izlerin en az bir hedefe atanmış izlere olan orandır.

$$TRR^m(k) = \frac{N_{valid}^m(k)}{N_{valid}^m(k) + N_{spur}^m(k)}$$

- Sahte İz Ortalaması Oranı (Spurious Track Mean Ratio): Sahte izlerin en az bir hedefe atanmış izlere olan orandır.

$$STR^m(k) = \frac{N_{spur}^m(k)}{N_{valid}^m(k) + N_{spur}^m(k)}$$

#### B. Zamansal Ölçütler

- İz Parçalanması Oranı (Rate of Track Fragmentation): İzleme algoritmasının sürekli bir iz sağlayamadığı yani bir izin atandığı referans hedeflerin değiştiği durumlar tespit edilerek tüm izler ve tüm Monte Carlo koşulları arasında ortalaması alınarak izlerin kalitesi hakkında fikir sahibi olunabilir.
- İz Gecikmesi (Track Latency): Yeni ya da ölü hedeflerin onaylanarak operatörlere sunulma süreleri füzyon sistemlerinde önemli bir kriterdir ve performans ölçütü olarak kullanılabilirler.
- Toplam İşletim Zamanı (Total Execution Time): Hedef izleme ve füzyon sistemleri gerçek zamana yakın çalışması beklenen sistemlerdir. Bu nedenle hesaplama maliyeti ve süresi dikkate alınması gereken başka bir ölçüttür.

#### C. Doğruluk (Accuracy) Ölçütleri

Bu bölümde anlatılan doğruluk ölçütleri bir referans doğruya göre hesaplandıkları için bağıl ölçüt olarak adlandırılırlar. Doğruluk ölçütleri performans analizi için en sık başvurulan ölçütlerdir. Bu kapsamda hesaplama katılmadıkları için doğru atanamamış

izler önceki bölümlerde anlatılan iz sayısı ölçütleri ile değerlendirilmelidirler.

- Kare Ortalama Karekök Hata (Root Mean Squared Error):  $l$  referans hedefi ve  $n$  atanmış izi için kare ortalama karekök hata tüm Monte Carlo koşulları için hesaplanıp ortalaması alınır:

$$\mathcal{R}^l(k) = \sqrt{\frac{1}{N_M^l(k)} \sum_{m=1}^{N_M^l(k)} \|e_m^l(k)\|^2}$$

Aynı şekilde tüm zamanlar için ortalaması şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{\mathcal{R}}^l = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\mathcal{R}^l(k))^2}$$

- Ortalama Öklid Hatası (Average Euclidean Error)

$$\mathcal{E}^l(k) = \frac{1}{N_M^l(k)} \sum_{m=1}^{N_M^l(k)} \|e_m^l(k)\|, \bar{\mathcal{E}}^l(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathcal{E}^l(k)$$

- Ortalama Harmonik Hata (Average Harmonic Error): Kare ortalama karekök hata ve ortalama öklid hatası büyük hata terimlerini daha çok ön plana çıkarak ölçütlerdir. Buna karşın ise daha küçük hata terimlerini ön plana çıkaran bir ölçüt sunar.

$$\mathcal{H}^l(k) = \left( \frac{1}{N_M^l(k)} \sum_{m=1}^{N_M^l(k)} \|e_m^l(k)\|^{-1} \right)^{-1}$$

$$\bar{\mathcal{H}}^l(k) = \left( \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\mathcal{H}^l(k))^{-1} \right)^{-1}$$

- Ortalama Geometrik Hata (Average Geometric Error): Ortalama geometrik hata ise diğer ölçütlere göre iyimser ya da kötümser olmayan daha dengeli bir sonuç sunar.

$$\log(\mathcal{G}^l(k)) = \frac{1}{N_M^l(k)} \sum_{m=1}^{N_M^l(k)} \log(e_m^l(k))$$

$$\log(\bar{\mathcal{G}}^l) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \log(\log(\mathcal{G}^l(k)))$$

#### IV. KESİN REFERANS HEDEFLERİN MEVCUT OLMADIĞI DURUMDA KULLANILAN METRİKLER

Referans hedeflerin mevcut olmadığı hallerde mutlak doğruya göre hesaplanan ölçütlerde mevcut olmayacaktır. Örneğin operasyonel bir sistemde kooperatif hedefler için

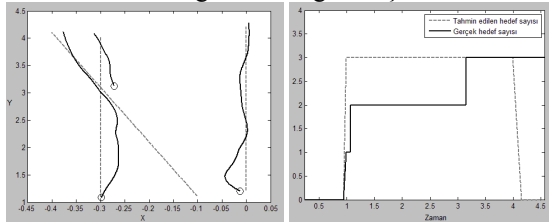
bazı durumlarda mutlak doğrular bilinse de kooperatif olmayan hedefler için mutlak doğrular bilinmediği için farklı ölçütlerin belirlenmesi gereklidir. Bu durumda kullanılabilecek tutarlılık ile ilgili ölçütlerden bazıları aşağıda verilmiştir:

- **İz Yaşam Süresi (Track Life Time):** İzler ölçümlerle güncellenmedikleri durumda bir süre sonra yaşamları son bulacak ve silineceklerdir. Yaşam süresi çok kısa olan izler büyük ihtimalle yanlış alarmlara aittir. Bu ölçüt ile yanlış alarm olan izlerin ve bu izlerin toplam izler içindeki oranı belirlenebilmektedir.
- **İz Tutarlılığı (Track Consistency):** Yeni ölçümlerin izlere atanmadığı her bir zaman dilimi  $TC_n^m$  değeri arttırılır. Tüm Monte Carlo koşulları için ortalama bir değer  $TC_n^*$  şu şekilde hesaplanır.  $TC_n^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M TC_n^m$
- **İzleme Sonuçlarının Tutarlılığı (Consistency of Tracking Results):** Kontrol edilebilecek diğer bir parametre de izleme ve füzyon sonuçlarının tutarlılığıdır. Ortaya çıkan izleme filtrelerinin buluş (innovation) sonuçları ve kovaryansları üzerine ki-kare testi uygulanarak örneğin %95 güven aralığına denk gelip gelmediği kontrol edilebilir.

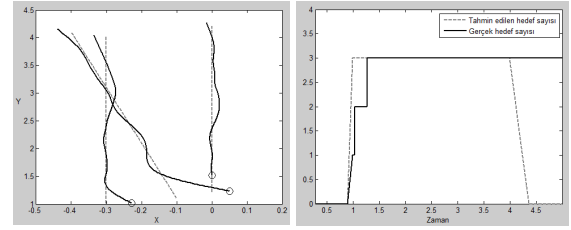
Çalışmada özetlenen ölçütler her bir sensörün çıktılarını değerlendirmekte kullanılabileceği gibi füzyon sonrası çıktıları değerlendirmekte de kullanılabilir. Böylece füzyon kazancı saptanabilir. Hedefin zaman içinde farklı sensörlerin kapsama alanına girerek ilerlemesi gibi senaryolarda hedefin aynı iz numarası ile kesintisiz takibi çoklu sensör iz füzyonu ile mümkün olacak ve füzyon kazancı bu gibi durumlarda açık şekilde gözlemlenecektir.

## V. SİMÜLASYONLAR

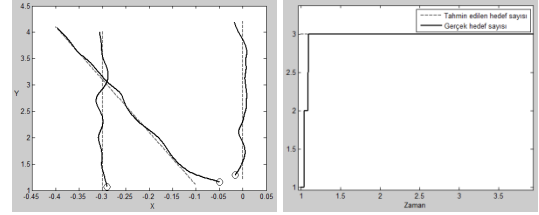
Bu çalışma kapsamında yapılan simülasyonlarda parazit yankı olan ortamlarda yakın hedefler ve hedef rota çakışmalarının olduğu senaryolar için kaçırılan iz sayısı ve tamlik ölçütü gibi iz sayısı ölçütleri açısından sensör füzyonunun sağladığı performans artışı açıkça görülmektedir. Bu senaryoda dört sensör kullanılmış, bir sensör tarafından geç tespit edilen ya da tespit edilemeyen iz diğer sensörler tarafından zamanında tespit edilmiş ve sensör füzyonu ile tekil sensörlerin yetersiz kaldığı durumlar en aza indirgenmesi sağlanmıştır.



Şekil 2. Sensör 1 izleme performansı



Şekil 3. Sensör 2 izleme performansı



Şekil 4. Sensörler arası füzyon sonrası izleme performansı

Doğruluk ölçütlerinin değerlendirme kriteri olarak alındığı önceki bir çalışma kapsamında yapılmış simülasyonlarda çapraz korelasyonların bilinmediği durumlarda sensörler arası tutarlılık yüksek ise kovaryans kesiştirme, düşük ise kovaryans birleştirme yöntemleri doğruluk performansı açısından ön plana çıkmıştır. [6]

## VI. SONUÇLAR

İz füzyonu yöntemlerinin performanslarının analiz edilebilmesi için farklı ölçütler bulunmaktadır. Bu ölçütler algoritma geliştirme sürecinin objektif kısıtlara dayandırılması için önemli araçlardan biri olarak kullanılmaktadır. Özellikle referans hedeflerin mevcut olmadığı durumlarda kullanılmak üzere yeni ölçütlerin geliştirilmesine ihtiyaç olduğu değerlendirilmektedir.

## VII. BİLGİLENDİRME

Bu çalışmayı destekledikleri için HAVELSAN Sahil Gözetleme Radar Sistemi Proje ekibine teşekkür ederim.

## KAYNAKÇA

- [1] Liggins M. E., Hall D., Llinas J., *Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice, Chapter 17: Studies and Analyses within Project Correlation, Second Edition*, CRC Press, 2008
- [2] Mori S., Chang K.-C., Chong C.-Y., "Comparison of Track Fusion Rules and Track Association Metrics", *Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion*, 2012
- [3] Hall D., Chong C.-Y., Llinas J., Liggins II M., *Distributed Data Fusion for Network-Centric Operations*, CRC Press, 125-144, 2012
- [4] Gorji A. A., Tharmarasa R., and Kirubarajan T., "Performance Metrics for Multiple Target Tracking Problems", *Proceedings of the 14th International Conference on Information Fusion*, 2011
- [5] Blasch E., Pribilski M., Daugherty B., Roscoe B., and Gunsett J., "Fusion Metrics for Dynamic Situation Analysis," *Proc. SPIE* 5429, 2004
- [6] Evirgen E.A., "Çoklu Sensör İz Füzyonu Yöntemlerinin Simülasyon Yoluyla Değerlendirilmesi", *USMOS 2015 Bildiriler Kitabı*, 458-469, 2015